AIRI - ASSOCIAZIONE ITALIANA PER LA RICERCA INDUSTRIALE

LE INNOVAZIONI DEL PROSSIMO FUTURO



TECNOLOGIE PRIORITARIE
2° VOLUME

Airi
ASSOCIAZIONE ITALIANA PER LA RICERCA INDUSTRIALE

AGRA

20

AIRI - Associazione Italiana per la Ricerca Industriale

Airi – associazione con personalità giuridica - sin dalla costituzione nel 1974 promuove la ricerca industriale in Italia e nell'Unione Europea.

Punto di forza che ne caratterizza le iniziative è la cooperazione tra associati: gruppi industriali, imprese e centri di ricerca privati, università ed enti pubblici di ricerca, associazioni di categoria, parchi scientifici, istituti finanziari.

Questa significativa rappresentatività fa di Airi opinion leader e interlocutore autorevole per gli orientamenti tecnologici nelle politiche della ricerca, per l'adeguata gestione e attuazione del sostegno pubblico, e più in generale per la più ampia diffusione della cultura della ricerca industriale italiana.

Soci sostenitori

BRACCO
LIFE FROM INSIDE

Consiglio Nazionale delle Ricerche

eni

MAPEI

PIRELLI

con il supporto di

INNOVHUB
STAZIONI SPERIMENTALI PER L'INDUSTRIA
innovazione e ricerca

>LE INNOVAZIONI DEL PROSSIMO FUTURO<

TECNOLOGIE PRIORITARIE PER L'INDUSTRIA
X edizione – 2020

VOLUME 2 - LE TECNOLOGIE PRIORITARIE

Airi – Associazione Italiana per la Ricerca Industriale

Le innovazioni del prossimo futuro
Tecnologie Prioritarie per l'Industria
X edizione – 2020
Volume 2 – Le Tecnologie Prioritarie

Agra Editrice srl
sede legale
Viale B. Bardanzellu 77N 00155 Roma
tel +39 0644254205
fax +39 0644254239
e-mail info@agraeditrice.it
www.agraeditrice.it

Copyright © 2020 AIRI
Associazione Italiana per la Ricerca Industriale
viale Gorizia, 25/c
I – 00198 Roma
tel +39 068848831 – 068546662
fax +39 068552949
e-mail info@airi.it
www.airi.it

Finito di stampare
nel mese di marzo 2020
Realizzazione editoriale
Agra Editrice srl
Foto di copertina
Shutterstock
Stampa
1Sec srl – Roma
Distribuzione in libreria
Agra Editrice srl

Tutti i diritti sono riservati ad Airi. Nessuna parte di questo libro può essere riprodotta o utilizzata in alcun modo, senza l'autorizzazione scritta di Airi né con mezzi elettronici né meccanici, incluse fotocopie, registrazione o riproduzione attraverso qualsiasi sistema di elaborazione dati.

INDICE

Settore 1 >AMBIENTE<		**12**
Tecnologia prioritaria n. 1	Tecnologie ecosostenibili per il riciclo e riutilizzo delle plastiche dure	**15**
Tecnologia prioritaria n. 2	Robotica ambientale	**18**
Tecnologia prioritaria n. 3	Approccio integrato alla chiusura del ciclo dei raee	**23**
Tecnologia prioritaria n. 4	Tecnologie per il miglioramento dell'impatto ambientale degli pneumatici a fine vita	**28**
Tecnologia prioritaria n. 5	Tecnologie per il recupero selettivo di surnatante da acqua di falda (e-hyrec®)	**32**
Tecnologia prioritaria n. 6	Campionatori passivi per il monitoraggio della componente volatile (voc) delle matrici ambientali	**37**
Tecnologia prioritaria n. 7	Caratterizzazione di siti contaminati mediante approccio innovativo: protocollo integrato di tecniche di fingerprinting isotopico e di tecniche molecolari (eni/ syndial)	**43**
Tecnologia prioritaria n. 8	Robotica per il monitoraggio di ambienti acquatici	**47**
Tecnologia prioritaria n. 9	Bioraffinerie di nuova generazione	**50**
Settore 2 >ENERGIA<		**54**
1. DIGITALIZZAZIONE NELL'INDUSTRIA ENERGETICA		
Tecnologia prioritaria n. 1	Big data e analytics: le nuove opportunità nel settore energetico	**57**
Tecnologia prioritaria n. 2	Robotica nell'industria petrolifera	**65**
Tecnologia prioritaria n. 3	Applicazione della tecnologia blockchain nel demand-response	**70**
2. ACCUMULO DI ENERGIA		
Tecnologia prioritaria n. 4	Accumulo elettrochimico e batterie in flusso	**75**
Tecnologia prioritaria n. 5	Tecnologie accumulo chimico – power to gas	**81**
Tecnologia prioritaria n. 6	Sistemi di accumulo termico	**87**

Tecnologia prioritaria n. 7	Sistemi di gestione per l'accumulo di energia e monitoraggio della qualità del servizio elettrico	**93**
3. TECNOLOGIE PRO VETTORI ENERGETICI		
Tecnologia prioritaria n. 8	Bio-feedstock di 2a e 3a generazione	**100**
Tecnologia prioritaria n. 9	Nuovi processi di fermentazione	**105**
Tecnologia prioritaria n. 10	Green Refinery: schema integrato per una raffinazione sostenibile	**111**
Tecnologia prioritaria n. 11	Idrogeno	**118**
4. TECNOLOGIE PER L'EFFICIENZA ENERGETICA E LA SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE		
Tecnologia prioritaria n. 12	Sviluppo lubrificanti autotrazione di nuova generazione	**123**
Tecnologia prioritaria n. 13	Carburanti innovativi per riduzione CO_2	**131**
Tecnologia prioritaria n. 14	Materiali elastomerici per pneumatuci energy-saving	**139**
Tecnologia prioritaria n. 15	Alghe e utilizzo di CO_2	**145**
Tecnologia prioritaria n. 16	Valorizzazione CO_2 per materiali avanzati	**151**
Tecnologia prioritaria n. 17	Cementi cellulari innovativi a bassa impronta energetica	**154**
Tecnologia prioritaria n. 18	Materiali e tecnologie di processo avanzate per turbine a gas per la generazione elettrica	**159**
Tecnologia prioritaria n. 19	Lubrificanti innovativi per il settore industria	**165**
5. VALORIZZAZIONE ENERGIE RINNOVABILI		
Tecnologia prioritaria n. 20	Celle fotovoltaiche avanzate e innovative	**170**
Tecnologia prioritaria n. 21	Applicazioni large scale del fotovoltaico	**176**
Tecnologia prioritaria n. 22	Solare termico a concentrazione e ibridizzazione	**186**
Tecnologia prioritaria n. 23	Collettori solari luminescenti e integrazione urbana del fotovoltaico	**195**
Tecnologia prioritaria n. 24	Flessibilità e sicurezza del sistema elettrico in sinergia con la rete gas	**200**
Tecnologia prioritaria n. 25	Soluzioni avanzate per lo sfruttamento sostenibile e ad alta efficienza della risorsa geotermica non convenzionale	**206**
Settore 3 >CHIMICA<		**210**
Tecnologia prioritaria n. 1	Conversione chimica diretta di biomasse lignocellulosiche grezze o di scarto in intermedi e biofuels	**213**
Tecnologia prioritaria n. 2	Strategie innovative per la valorizzazione dei fanghi di cartiera	**218**

Tecnologia prioritaria n. 3	Utilizzo di scarti agroalimentari nella tecnologia dell'industria conciaria	**225**
Tecnologia prioritaria n. 4	Vernici e pitture da materie prime d'origine bio-rinnovabile a scala industriale	**230**
Tecnologia prioritaria n. 5	Valorizzazione delle biomasse e loro riutilizzo	**236**
Tecnologia prioritaria n. 6	Sintesi di etil diazoacetato in flusso	**242**
Tecnologia prioritaria n. 7	Additive manufacturing e sviluppo di materiali	**244**
Tecnologia prioritaria n. 8	Produzione di acido acrilico e acrilonitrile da biomasse	**251**

Settore 4 >FARMACEUTICA E BIOTECNOLOGIE PER LA SALUTE< **258**

Tecnologia Prioritaria N. 1	Nuovi approcci delle tecnologie omiche	**261**
Tecnologia Prioritaria N. 2	Tecnologie innovative per il Drug Discovery	**268**
Tecnologia Prioritaria N. 3	La nuova diagnostica in vitro	**275**
Tecnologia Prioritaria N. 4	Produzione di biofarmaci e vaccini	**282**
Tecnologia Prioritaria N. 5	Imaging Molecolare	**289**
Tecnologia Prioritaria N. 6	Nanomedicina	**295**
Tecnologia Prioritaria N. 7	Dispositivi medici e tecnologie mini-invasive	**299**
Tecnologia Prioritaria N. 8	Terapie avanzate e gene editing	**305**

Settore 5 >TECNOLOGIE DIGITALI< **314**

Tecnologia prioritaria n. 1	Cloud Computing	**317**
Tecnologia prioritaria n. 2	Internet delle cose (IoT)	**325**
Tecnologia prioritaria n. 3	Big data e Data Science	**333**
Tecnologia prioritaria n. 4	Intelligenza Artificiale, Machine Learning e Deep Learning	**342**
Tecnologia prioritaria n. 5	Tecnologie immersive: Realtà virtuale e realtà aumentata	**349**
Tecnologia prioritaria n. 6	Ecosistemi digitali	**352**
Tecnologia prioritaria n. 7	Reti e Servizi Radio mobili	**356**
Tecnologia prioritaria n. 8	Internet e la sua sicurezza	**369**
Tecnologia prioritaria n. 9	Tecnologie per "Online Contents"	**373**

Settore 6 >MICROELETTRONICA E SEMICONDUTTORI< **380**

Tecnologia prioritaria n. 1	Integrazione di sistemi elettronici su silicio	**383**
Tecnologia prioritaria n. 2	Integrazione embedded-non-volatile-memory su silicio	**388**

Tecnologia prioritaria n. 3	Tecnologie per componenti optoelettronici e fotonici	**396**
Tecnologia prioritaria n. 4	Tecnologie per componenti fotonici basati su tecnologie quantistiche	**399**
Tecnologia prioritaria n. 5	Sistemi e protocolli per la trasmissione dell'informazione quantistica	**403**
Tecnologia prioritaria n. 6	Opportunità nelle reti di telecomunicazione con l'avvento del grafene	**408**
Tecnologia prioritaria n. 7	Tecnologie per la sensoristica chimica	**412**
Tecnologia prioritaria n. 8	Materiali smart tecniche di fabbricazione additiva e metamateriali per microsistemi	**415**
Tecnologia prioritaria n. 9	Electronic artificial olfactory systems (enose)	**422**
Tecnologia prioritaria n. 10	Applicazioni elettroniche della luce di sincrotrone e laser ad elettroni liberi	**429**
Tecnologia prioritaria n. 11	Sviluppo di nuovi materiali per la microelettronica: il caso degli ossidi ad alta costante dielettica	**434**
Tecnologia prioritaria n. 12	Tecnologie per smart systems: opportunità per una silicon foundry europea	**439**
Settore 7 >TRASPORTI<		**444**
TECNOLOGIE PRIORITARIE - TRASPORTO STRADALE		
Tecnologia prioritaria n. 1	Combustibili	**447**
Tecnologia prioritaria n. 2	Sistemi di motopropulsione	**451**
Tecnologia prioritaria n. 3	Sicurezza integrata	**455**
Tecnologia prioritaria n. 4	Materiali innovativi	**463**
Tecnologia prioritaria n. 5	Tecnologie dell'auto connessa per una mobilità efficiente, ecologica e sicura	**482**
Tecnologia prioritaria n. 6	Soluzioni & tecnologie per l'interazione uomo macchina (HMI)	**489**
Tecnologia prioritaria n. 7	Efficienza energetica	**493**
Tecnologia prioritaria n. 8	CYBER FLEET: la soluzione IOT Pirelli per il business delle flotte	**498**
TECNOLOGIE PRIORITARIE - TRASPORTO FERROVIARIO		
Tecnologia prioritaria n. 9	Metodologie e tecnologie innovative per la diagnostica predittiva del sistema ferroviario e metropolitano a guida autonoma tramite veicoli commerciali	**501**

Tecnologia Prioritaria N. 10	Tecnologie e materiali innovativi per l'incremento della capacità in ambito ferroviario	**504**
Tecnologia Prioritaria N. 11	Tecnologie per la tracciabilità e diagnostica dei carri merci	**506**
Tecnologia Prioritaria N. 12	Tecnologie per lo sviluppo di veicoli ferroviari ad alta efficienza energetica	**508**
TECNOLOGIE PRIORITARIE - TRASPORTO NAVALE		
Tecnologia Prioritaria N. 13	Soluzioni e tecnologie innovative per garantire una maggiore sostenibilità ambientale e una migliore efficienza energetica a bordo	**512**
Tecnologia Prioritaria N. 14	Soluzioni e tecnologie innovative per la digitalizzazione, la comunicazione e la connettività a bordo	**514**
Tecnologia Prioritaria N. 15	Soluzione e tecnologie innovative per la promozione della completa automazione della nave	**516**
Tecnologia Prioritaria N. 16	Soluzione e tecnologie innovative per la realizzazione di nuovi mezzi marini finalizzati al pieno sviluppo di diversi promettenti settori della Blue Economy	**517**
Tecnologia Prioritaria N. 17	Soluzioni e tecnologie innovative per la transizione del processo produttivo verso una maggiore efficienza e sicurezza	**519**

Settore 8 >BENI STRUMENTALI PER L'INDUSTRIA E I SERVIZI<		**522**
Tecnologia prioritaria n. 1	Macchine e sistemi di produzione intelligenti eco-sostenibili sviluppati secondo il paradigma della Smart-Factory / Industry 4.0	**525**
Tecnologia prioritaria n. 2	Knowledge based design: Nuovi strumenti ad alto contenuto di conoscenza per la progettazione, simulazione e messa in produzione di prodotti avanzati	**528**
Tecnologia prioritaria n. 3	Gestione dei sistemi produttivi: Metodi e standard per la automazione ed integrazione di sistemi produttivi complessi	**533**
Tecnologia prioritaria n. 4	Logistica e distribuzione: Metodi e tecnologie ICT basate su Internet per la integrazione in tempo reale degli attori della filiera dal retail, ai produttori, ai fornitori	**537**

Tecnologia prioritaria n. 5	Componenti e sottosistemi per il miglioramento dell'efficacia, dell'efficienza e della sostenibilità ambientale	**540**
Tecnologia prioritaria n. 6	Nuovi macchinari, processi e materiali per la manifattura di prodotti avanzati tramite tecniche additive	**546**
Tecnologia prioritaria n. 7	Trasformazione Biologica nell'Industria Manifatturiera	**552**
Settore 9 >SPAZIO<		**558**
Tecnologia prioritaria n. 1	Tecnologie per missioni gravimetriche	**561**
Tecnologia prioritaria n. 2	Tecnologie per l'esplorazione solare	**566**
Tecnologia prioritaria n. 3	Strutture avanzate ultraleggere e adattive	**570**
Tecnologia prioritaria n. 4	Robotica e intelligenza artificiale: un binomio strategico nell'ambito dell'esplorazione spaziale	**578**
Tecnologia prioritaria n. 5	Tecnologie per il rientro atmosferico e l'esplorazione	**584**
Tecnologia prioritaria n. 6	Sistemi avanzati per integrazione, rifornimento, trasporto e rimozione satelliti/detriti in orbita	**603**
Tecnologia prioritaria n. 7	Tecnologie e applicazioni per la sicurezza nello spazio	**608**
Tecnologia prioritaria n. 8	Tecnologie per antenne a bordo di satelliti	**618**
Tecnologia prioritaria n. 9	Tecnologie di miniaturizzazione equipaggiamenti per microsatelliti, payload compatti (sensori e camere per l'osservazione della terra) e relative applicazioni di emergenza	**622**
Tecnologia prioritaria n. 10	Tecnologie per radar da osservazione della terra	**633**
Tecnologia prioritaria n. 11	Sistemi per la gestione e trasmissione dati ad altissima velocità nelle bande ka e x per le future missioni di osservazione della terra	**639**
Tecnologia prioritaria n. 12	Tecnologie avanzate basate su intelligenza artificiale per il trattamento di immagini radar	**643**
Tecnologia prioritaria n. 13	Tecnologie di cybersecurity per la protezione dei sistemi spaziali	**649**
Tecnologia prioritaria n. 14	Orologi atomici spaziali "next generation"	**656**
Tecnologia prioritaria n. 15	Tecnologie per la propulsione spaziale: elettrica, avanzata, ramjet/scramjet (volo ipersonico e 2 stage 2 orbit)	**659**
Tecnologia prioritaria n. 16	Sviluppo nuovi propellenti solidi	**683**
Tecnologia prioritaria n. 17	Tecnologie per l'accesso allo spazio	**686**

Tecnologia prioritaria n. 18	Serbatoi e strutture di nuova generazione per lanciatori e veicoli spaziali	**699**
Tecnologia prioritaria n. 19	Additive manufacturing	**714**
Tecnologia prioritaria n. 20	Tecnologie flessibili di telecomunicazione per colmare il divario digitale e per applicazioni governative	**739**
Tecnologia prioritaria n. 21	Tecnologie di guida e navigazione autonomi tramite elaborazione di immagini	**744**
Tecnologia prioritaria n. 22	Controllo ambientale evoluto	**748**
Tecnologia prioritaria n. 23	Stoccaggio e distribuzione di energia	**757**
Tecnologia prioritaria n. 24	Ottica e fotonica per lo spazio: la nuova frontiera per innovare alla velocità della luce	**760**

>SOCI Airi< **766**

SETTORE 1

>AMBIENTE<

MEMBRI DEL GRUPPO DI LAVORO

Settore – Ambiente

Coordinatori	
SYNDIAL	**Luciano Zaninetta**
FINCANTIERI	**Lucio Sabbadini**
Componenti	
CNR	**Fernando Ferri**
CONSORZIO MISTER	**Michele Muccini**
ENEA	**Danilo Fontana**
ENI	**Danilo Maddalena**
	Jacopo Tonziello
	Massimiliano Baric
	Francesca Rubertelli
	Ilaria Pietrini
	Raffaella Borrelli
PIRELLI	**Luca Giannini**
SYNDIAL	**Silvia Frisario**

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 1

TECNOLOGIE ECOSOSTENIBILI PER IL RICICLO E RIUTILIZZO DELLE PLASTICHE DURE

Il trattamento dei rifiuti urbani risulta essere estremamente attuale e prioritario considerando l'elevata quantità di rifiuti che ogni anno nel nostro paese continuano a finire in discarica. Dal rapporto ISPRA 2017 risulta che nel 2016 la produzione di rifiuti urbani in Italia è stata pari a 30,1 milioni di tonnellate, con un aumento del 2% rispetto al 2015. Tali dati hanno mostrato una inversione di tendenza rispetto al periodo 2011-2015, durante il quale vi era stata una progressiva riduzione della produzione totale dei rifiuti urbani.

Occorre inoltre sottolineare che la percentuale di raccolta differenziata nel 2016 è stata pari al 52,5% della produzione nazionale, che equivale a circa 15,8 milioni di tonnellate con una crescita del 12,8% rispetto all'anno precedente. Nonostante tale andamento positivo, ancora oggi quasi la metà dei rifiuti urbani non viene riciclata.

In tale contesto il recupero di materiali plastici sta ricevendo una crescente attenzione a causa degli effetti devastanti che derivano dalla loro dispersione nell'ambiente. I dati ISPRA relativi al 2016 indicano che la plastica costituisce circa il 6,8% del quantitativo totale di rifiuti urbani avviati a riciclaggio. Considerato il largo impiego delle materie plastiche per la produzione di beni di consumo, risulta evidente che una percentuale ancora troppo elevata di plastiche non ha attualmente un'opportuna filiera di gestione e va ad accrescere la frazione di rifiuti smaltiti in discarica.

Una particolare attenzione deve essere rivolta alle plastiche dure che ad oggi non rientrano nelle categorie già servite dai consorzi di filiera e non sono pertanto riciclate con un conseguente incremento del quantitativo di rifiuti indifferenziati.

Da alcuni recenti studi si stima che l'incidenza delle plastiche dure sia pari a circa il 3,3% del totale dei rifiuti prodotti, una quantità non trascurabile, che proiettata a livello nazionale corrisponde a circa 800.000 ton/anno di materiali che non trovano una via di riutilizzo [Fonte: Progetto Replace-Belt, dati ETRA, http://www.replacebelt.eu]. Il quantitativo di plastiche dure dirette in discarica sul territorio italiano è quindi una importante porzione del rifiuto indifferenziato.

Una stima dell'incidenza delle plastiche non da imballaggio è stata riportata recentemente sulla base di dati relativi alla produzione di materiali plastici [Fonte: Un mondo senza plastica? Una filiera da riprogettare da zero in un'ottica circolare, E. Comelli, Novembre 2018, Nova24Tec]. Le analisi effettuate hanno mostrato che circa il 26% della produzione complessiva di plastica è utilizzata per gli imballaggi e di questa quota solo il 14% viene riciclato. Tali dati confermano l'incidenza significativa delle plastiche non da imballaggio.

Ad oggi, i principali limiti al riciclo delle plastiche dure sono rappresentati dall'eterogeneità dei materiali costituenti e dalla mancanza di normative specifiche per il loro riutilizzo.

È pertanto necessario identificare processi ecosostenibili per la gestione ed il trattamento di rifiuti domestici costituiti da plastiche dure, al fine di ridurre il loro impatto sull'ambiente e promuovere l'ecodesign di nuovi prodotti.

MOTIVAZIONI STRATEGICHE PER LO SVILUPPO

Per ridurre l'impatto ambientale delle plastiche dure attualmente non coperte da filiera è necessario:

- Sviluppare tecnologie ecosostenibili ed applicabili su scala industriale per una efficace separazione dei materiali presenti nelle plastiche dure multicomponenti sulla base delle loro diverse proprietà chimico-fisiche al fine di ottenere diverse frazioni polimeriche con un maggiore grado di purezza;
- Sviluppare tecnologie per il riutilizzo delle plastiche dure valutando la possibilità di utilizzo in miscela con plastiche da imballaggio e materie prime vergini in diversa percentuale e tenendo conto delle proprietà meccaniche del materiale prodotto.

Per quanto riguarda le tecnologie di separazione delle componenti presenti nelle plastiche dure, il primo step di trattamento prevede la produzione di scaglie mediante trattamenti meccanici, fasi di lavaggio e di asportazione delle frazioni indesiderate. Gli step successivi prevedono l'ottimizzazione di procedure per la separazione delle componenti presenti sulla base della diversa densità e solubilità in opportuni solventi, mediante metodi a basso costo che possano essere facilmente integrati negli impianti attualmente utilizzati.

L'obiettivo primario è migliorare l'efficienza dei metodi di separazione allo scopo di migliorare la qualità delle frazioni ottenute e quindi le possibilità di riutilizzo e valorizzazione. Nella fase di sviluppo delle metodologie di separazione è fondamentale che si tenga in considerazione non solo dell'efficienza dei processi di trattamento ma anche gli aspetti economici, la scalabilità a livello industriale e la possibilità di integrazione nelle attuali filiere sfruttando impianti di trattamento già esistenti.

La qualità dei materiali prodotti (materie prime seconde) può essere ulteriormente migliorata prima del riutilizzo, sottoponendo tali materiali a successivi trattamenti per la rimozione di eventuali componenti contaminanti.

Riguardo il riutilizzo delle plastiche dure per la produzione di nuovi oggetti, l'uso combinato di frazioni derivanti da plastiche dure e da imballaggio in diversa percentuale può permettere di migliorare le proprietà dei materiali ottenuti ed ampliare i settori di utilizzo dei prodotti finali. Ove necessario, in fase di trattamento potrebbero essere addizionate anche materie prime vergini, oltre all'aggiunta di specifici additivi.

Lo sviluppo di specifiche tecnologie per il recupero e riutilizzo di plastiche dure derivanti da rifiuti domestici rappresenta un'importante sfida ed una valida opportunità per alleggerire la frazione di rifiuto indifferenziato che grava sulle discariche, permettendo, inoltre, di recuperare preziose risorse che possano essere sfruttate a livello industriale in nuovi cicli produttivi.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Ad oggi, non esiste ancora un opportuno percorso di raccolta, riciclo e valorizzazione dei rifiuti costituti da plastiche dure, a differenza dei rifiuti costituiti da plastiche da imballaggio. Per questi ultimi è infatti presente una dedicata filiera di gestione che consente di trattare tali plastiche come rifiuti differenziati.

La possibilità di riutilizzo delle plastiche non da imballaggio è stato oggetto di studio nell'ambito di progetti nazionali ed europei, aventi come obiettivo l'individuazione di possibili percorsi di riutilizzo e valorizzazione della plastica derivante dai rifiuti urbani. I risultati finora ottenuti sono promettenti ma le maggiori criticità riguardano ancora l'efficienza dei processi di separazione e lo sviluppo di filiere sostenibili sia dal punto di vista ambientale che economico.

Diverse metodologie di separazione, con riferimento in particolare alle componenti polimeriche, sono state oggetto di studio, includendo metodi basati sulla diversa densità, separazioni magnetiche, triboelettrostatiche e metodi ottici. Tuttavia, sono necessarie ulteriori indagini allo scopo di individuare delle procedure di trattamento e riutilizzo che oltre ad essere efficaci siano anche a basso costo e permettano di migliorare la qualità dei prodotti finali affinché possano trovare una reale applicazione nel recupero delle plastiche non da imballaggio.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

Lo sviluppo delle tecnologie di recupero e riutilizzo necessita lo studio delle proprietà chimico-fisiche dei materiali plastici, prima e dopo le fasi di separazione e lavorazione per la produzione di nuovi oggetti, e la realizzazione di un sistema prototipo per lo scale-up, l'analisi del ciclo di vita e dell'efficienza dell'intero processo di trasformazione, nonché lo studio delle potenzialità di mercato dei prodotti.

Lo sviluppo e la validazione di tali tecnologie richiede competenze multidisciplinari ed il coinvolgimento di Enti di Ricerca e partner industriali.

POTENZIALE RICADUTA OCCUPAZIONALE

La definizione di nuove tecnologie per il recupero e riutilizzo di materiali plastici attualmente non riciclabili, oltre a ridurre l'impatto ambientale di tali materiali, consentirebbe il potenziamento ed ampliamento delle strutture per le fasi di raccolta, trattamento e riutilizzo delle plastiche con importanti ricadute anche a livello occupazionale.

In particolare, lo sviluppo di tecnologie di recupero e riutilizzo delle plastiche non da imballaggio ha potenziali ricadute occupazionali a due livelli:

- Negli impianti di trattamento dei rifiuti plastici per la produzione di materie prime seconde, includendo risorse per la loro gestione e per il controllo della qualità dei prodotti ottenuti;
- Nelle aziende che si occuperanno di trasformare le materie prime seconde in nuovi oggetti che possano essere immessi nel mercato.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 2
ROBOTICA AMBIENTALE

Il campo di utilizzo dei robot è molto più esteso della produzione industriale e comprende ambiti molto diversi: vediamo robotica comunemente applicata nell'esecuzione di operazioni sottomarine, nella esplorazione spaziale, nella medicina, persino nelle case per effettuare le pulizie e utilizzata in giocattoli.

È, quindi, naturale l'applicazione di tecnologie robotiche anche a compiti di tipo ambientale, dove la sostituzione della presenza diretta degli operatori permette migliori livelli HSE e maggiore efficienza, considerando che il contesto applicativo è variegato, comprendendo utilizzi terrestri, aerei, marini, sia di superficie sia sottomarini.

In generale, i vari sistemi robotici sono caratterizzati da diversi livelli di autonomia e tali diversità si riscontrano anche nella "Robotica Ambientale": esistono sistemi del tutto autonomi, p.es. AUV (Autonomous Underwater Vehicle) in grado di eseguire la missione di monitoraggio sottomarino in completa autonomia, senza nessun collegamento con la superficie; oppure robot gestiti direttamente dall'operatore, p.es. un drone aereo teleguidato per esplorare un ambiente non noto.

È facile prevedere nel prossimo futuro l'estensione delle possibilità applicative della Robotica Ambientale, rese fattibili dal livello tecnico e dall'affidabilità raggiunti dai componenti tecnologici dei sistemi robotici, cioè p.es. computer vision, sensoristica avanzata, computer miniaturizzati e a basso consumo, algoritmi di controllo, intelligenza artificiale, attuatori miniaturizzati, additive manufacturing, droni, etc.

Lo sviluppo in questo campo trae giovamento da applicazioni esterne al campo Ambientale: si consideri, ad esempio, quanto si sta investendo e sviluppando, in aziende e centri di ricerca, per la guida automatica di autoveicoli, con prevedibili ricadute nella filiera complessiva delle tecnologie correlate (visione computerizzata, intelligenza artificiale, etc.). Per sviluppare efficientemente la Robotica Ambientale sarà, quindi, necessario monitorare attentamente quanto avviene in altri campi a rapido sviluppo, al fine di cogliere le opportunità di trasferimento tecnologico.

Dando un'idea delle possibili applicazioni di Robotica Ambientale già in essere o immaginabili a breve, i robot sono utilizzabili per gestire lo stoccaggio, movimentazione, smaltimento e monitoraggio dei rifiuti, minimizzando quindi l'esposizione degli esseri umani a ambienti nocivi (tossici e nucleari). I robot possono gestire fusti o contenitori, preferibilmente dotati di identificatori RFID (Radio-Frequency IDentification per tracciarne i movimenti, ma possono anche gestire situazioni impreviste (p.es. contenitori danneggiati), facendo ricorso alla tele-operazione, cioè utilizzando un approccio di telecontrollo manuale di "man-in-the-loop". I robot possono raccogliere rifiuti dal mare e essere utilizzati per operazioni di disinquinamento marino, p.es. raccolta idrocarburi galleggianti.

Altra possibilità applicativa è lo smistamento dei rifiuti, sostituendo gli addetti al riciclaggio, trat-

tandosi di un lavoro non solo "sporco", ma anche noioso e ripetitivo. Per questo scopo i bracci manipolatori avranno bisogno di essere integrati con sistemi di visione e capacità di intelligenza artificiale.
Restando nel campo terrestre, un'applicazione rilevante per la Robotica Ambientale consiste nel monitoraggio di:

- Siti industriali (p.es. impianti, tubazioni, ciminiere, scarichi, etc.)
- Siti inquinati (p.es. industrie dismesse, discariche, zone sotto attività di bonifica)
- Siti oggetto di incidenti (p.es. sversamenti, incendi)
- Alluvioni
- Esondazioni
- Mareggiate
- Stato della costa
- Stato fitosanitario delle colture e delle foreste

Il monitoraggio può essere eseguito in continuo e, se i robot sono dotati di movimento, può coprire tutta l'area interessata. Si descrive questa capacità come monitoraggio 4D, contrapposta a quanto si fa di norma con sistemi di monitoraggio fissi o campionamento manuale, dove l'informazione disponibile è solo puntuale, nello spazio e/o nel tempo.
Per queste applicazioni potrebbero essere utilizzati robot semoventi dotati di ruote/cingoli; tuttavia i recenti sistemi basati su droni sono molto più attraenti, permettendo di svolgere i compiti con ridotta logistica, superando agevolmente barriere architettoniche oppure potendo lavorare in altezza a costi limitati.
Un altro ambito applicativo rilevante è il monitoraggio delle acque di superficie e in profondità e dei sedimenti. In questo caso i robot sono tipicamente veicoli sottomarini, del tipo filoguidato (ROV Remotely Operated Vehicle), oppure a guida autonoma (AUV); questi ultimi potendo fare a meno del cavo, si prestano meglio a rilevazioni su ampie aree e in alta profondità.
Per queste applicazioni lo sviluppo tecnologico richiesto corre su due linee principali, che si possono applicare ai diversi ambiti (terrestre, sottomarino, aereo):

- Incremento del livello di autonomia: il sistema dovrebbe essere sempre meno dipendente dal controllo remoto dell'operatore, il quale dovrebbe idealmente passare dal tele-controllo manuale di ogni singola azione, al livello di "supervisore" delle attività svolte in autonomia dal robot. L'innovazione richiesta è quindi, p.es. per un drone sottomarino, la capacità di modificare autonomamente la rotta preimpostata per dettagliare meglio le misure attorno a un'anomalia rilevata.
- Capacità sensoriali dei robot: in questo campo servono sensori di dimensioni/massa molto limitati (vedi requisiti per installazione a bordo di un drone aereo e sottomarino), ma nello stesso tempo capacità di fornire tutte le informazioni richieste, p.es. non solo grandezze generiche di qualità di aria/acqua/sedimenti, ma anche la presenza di particolari sostanze (p.es. inquinanti chimici come metalli pesanti, coperture in cemento-amianto attraverso l'utilizzo di sensori multipiattaforma, etc.). L'alternativa percorribile sarebbe quella di fornire il robot di un sistema di campionamento e quindi eseguire le analisi a fine missione in labora-

torio. Questo approccio presenta l'ovvio limite legato al numero massimo dei campioni che si possono portare a bordo del robot e alla possibile criticità di conservazione del campione a bordo robot. Inoltre si perderebbe la caratteristica essenziale implementabile da un robot con elevato livello di "intelligenza": potere modificare/ottimizzare in tempo reale la sua missione in base alle misure dei propri sensori, simulando quanto potrebbe fare un operatore ben istruito.

MOTIVAZIONI STRATEGICHE PER LO SVILUPPO

La principale motivazione riguarda l'incremento realizzabile per la sicurezza ambientale e la salute. Sfruttare tutte le possibilità corrisponde all'applicazione del principio BAT (Best Available Technology) in campo ambientale, che spinge l'industria a recepire tutti i progressi tecnologici disponibili per minimizzare l'impatto ambientale e massimizzare la sicurezza per gli esseri umani.
Le tecnologie robotiche permettono di raggiungere questi risultati, contenendo inoltre i costi, minimizzando l'impiego diretto degli operatori e in molti casi con una logistica più leggera e di più breve impiego (basti pensare all'utilizzo dei droni rispetto a elicotteri).
Nuovi approcci in corso di sviluppo permettono la "residenza" dei robot negli ambienti da monitorare (p.es. stazioni di ricarica per veicoli AUV a fondo mare, oppure per droni nel sito da monitorare); queste tecnologie garantiscono quindi misure in continuo a costi ridotti e indipendentemente da fattori esterni, come p.es. accessibilità, condizioni meteo, etc.
Inoltre lo sviluppo di Know How specifico in Italia può trovare impiego per altre applicazioni, p.es. monitoraggio robotizzato integrità strutturale di impianti, ponti, etc.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

L'utilizzo di droni aerei, Unmanned Aerial Vehicles (UAV), è ormai un fatto consueto nel monitoraggio e nella salvaguardia ambientale: boschi, laghi, fiumi, paludi, colture, vigneti, spiagge, coste, parchi, mandrie, pascoli, etc. I droni forniscono un aiuto fondamentale nel preservare le risorse paesaggistiche ed agricole del nostro paese, con sorvoli a varie quote e scatti ad alta risoluzione che catturano lo stato ambientale dei luoghi. Inoltre i payload (sensoristica), oltre a telecamere visibile/infrarosso, comprendono VIS-VNIR Hyperspectral Camera, sensori per monitorare parametri dell'aria, p.es. monossido di carbonio, anidride carbonica, clorofluorocarburi, ossidi di azoto, idrogeno solforato, ozono, composti organici volatili, ammoniaca, idrogeno, metano, ozono, percloroetilene, cloro, formaldeide, biossido di azoto, anidride solforosa, particolato, etc.
Per migliorare la applicabilità di questi sistemi sarà necessario sviluppare tecnologie per ridurre gli attuali limiti di impiego:

- Tempo di volo molto breve
- Area coperta di ridotta estensione
- Altezza di volo modesta
- Presenza di vento e limiti nel controllo
- Autorizzazioni di volo

La rete di PMI italiane fornitrici di servizi con droni è in costante crescita: il rapporto presentato dall'Ente Nazionale per l'Aviazione Civile (ENAC) nel 2017 riporta oltre 2.500 le aziende attive nel settore dei droni in Italia, anche se in gran parte vede l'utilizzo di droni costruiti all'estero e soprattutto in Cina. La capacità italiana di costruzione e innovazione in questo campo esiste (p.es. sono 5 i Costruttori in serie di droni che hanno ottenuto la Certificazione di Progetto da parte ENAC) e va incoraggiata, in particolare per quanto riguarda applicazioni speciali molto innovative come potrebbero essere le applicazioni ambientali.
Tuttavia i componenti critici del payload arrivano per lo più da fornitori esteri e solo recentemente aziende italiane hanno sviluppato e commercializzato camere iperspettrali made in Italy.
Nel campo sottomarino possiamo distinguere diverse tipologie di robot:

- ROV – veicoli telecontrollati via cavo, possono essere utilizzati per campionamenti e monitoraggio anche in profondità, ma il vincolo del cavo riduce le possibilità di esplorazione
- AUV – veicoli autonomi, senza cavo e senza collegamento in tempo reale con l'operatore, possono avere una vasta capacità di monitoraggio anche ad elevate profondità. Il mercato globale degli AUV è in rapida espansione (sia commerciale, sia per la difesa) e raggiungerà ca. 700 M$ entro il 2022. Tra gli AUV possiamo individuare un sottoinsieme denominato "Glider"1, che essendo senza eliche (o con eliche di limitata potenza) si muovono nell'acqua in modo simile agli alianti, sfruttando la capacità di "planare" utilizzando le correnti per coprire in autonomia distanze molto grandi (migliaia di km), con minimo utilizzo di energia (ovviamente questa modalità di navigazione implica limiti rigidi sulle rotte che possono seguire). I glider sembrano molto interessanti per il monitoraggio ambientale in vasti volumi d'acqua, purché il payload abbia dimensioni e requisiti energetici molto ridotti.

Nel campo marino di superficie, si stanno proponendo sul mercato veicoli del tipo ASV (Autonomous Surface Vehicle). Si tratta di piccole imbarcazioni che possono arrivare anche alla dimensione di una pilotina; l'operatore interagisce con controlli ad alto livello, in quanto il robot è dotato di un buon livello di autonomia, che gli permette di seguire rotte e evitare autonomamente le collisioni. Esistono fornitori esteri (in particolare USA), in Italia l'attività in questo campo è prevalentemente di ricerca (p.es. Scuola Superiore Sant'Anna)

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE PER LO SVILUPPO

Lo sviluppo richiede un approccio multidisciplinare e richiede competenze specialistiche ed importanti investimenti mirati al trasferimento tecnologico e allo sviluppo di sistemi prototipali che dimostrino i vantaggi nelle applicazioni pratiche. Le industrie interessate dovranno trarre vantaggio dal supporto delle gli Enti di Ricerca e i laboratori universitari italiani, molti dei quali caratterizzati da livelli di eccellenza sulle tecnologie robotiche.
Gli investimenti necessari sono diversificati in base ai diversi ambiti esaminati: monitoraggio terrestre e marino (superficie e subacqueo), trattamento/gestione rifiuti, etc.
L'ambito considerato ha conseguenze rilevanti sui costi di sviluppo: si consideri p.es. che gli svi-

1 P.es. Slocum di Teledyne (USA), oppure n Italia il FOLAGA ibrido AUV/Glider di GRAALTech

luppi di robotica sottomarina sono inevitabilmente caratterizzati da alti costi, sia per l'utilizzo di componentistica speciale marina, sia per la logistica coinvolta nei test a mare. In questo campo si possono ipotizzare necessità nel range dei 10 ÷ 15 M€.
Lo sviluppo della robotica per monitoraggio terrestre (droni aerei e relativa sensoristica) richiede investimenti minori, nell'ordine dei 4 ÷ 8 M€
Le risorse necessarie complessive si possono stimare in 25 milioni di euro per i prossimi tre anni.

POTENZIALE RICADUTA OCCUPAZIONALE

Lo sviluppo di tecnologie di robotica ambientale ha potenziali ricadute occupazionali a due livelli:

- Rete/ecosistema delle aziende sviluppatrici dei sistemi robotici adatti a essere impiegati nei diversi ambiti considerati; in particolare tali aziende dovranno dotarsi di risorse umane con adeguata preparazione (preferibilmente laureati) sulle discipline robotiche e delle scienze ambientali (chimica, fisica, etc.)
- Aziende fornitrici di servizi, che potranno espandere il mercato in un contesto competitivo, incrementando il numero e la qualità delle risorse tecniche, per fornire servizi a privati e enti pubblici

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 3

APPROCCIO INTEGRATO ALLA CHIUSURA DEL CICLO DEI RAEE

La crescita esponenziale nell'utilizzo di apparati elettronici ed in generale di componentistica ad elevata tecnologia, pone in maniera stringente una riflessione sull'intero ciclo di vita di tale categoria di oggetti. La necessità di passare da una strategia "dell'usa e getta" ad una fondata sul recupero e riciclo dei materiali ad alto valore aggiunto (preziosi e/o strategici) contenuti nei "rifiuti" elettronici è determinata tra l'altro da un trend di crescita deciso e di lungo periodo del loro valore di mercato. Il quadro normativo che fa riferimento a questa categoria di rifiuti (RAEE, Rifiuti da Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche) è in continua evoluzione: la direttiva 2012/19/EU e le sue successive estensioni normative, che regolamentano il settore dei RAEE, impongono il raggiungimento di un target di raccolta del 45% dell'immesso al consumo nel triennio 2016-2018, che salirà verso un obiettivo di raccolta pari all'85% dei RAEE generati o al 65% dell'immesso al consumo, a partire dal 2019. Il 15 agosto 2018 è entrato in vigore il sistema "open scope" (direttiva UE 2018/849 sui veicoli fuori uso, pile e accumulatori e loro rifiuti, rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche) che considera AEE, oltre agli attuali prodotti tecnologici a fine vita, anche tutte le apparecchiature non esplicitamente escluse e quindi sono stati definiti come rifiuti anche molti prodotti che prima non erano considerati tali. Per fare qualche esempio oggi possono essere considerati RAEE carte di credito con chip, biciclette elettriche o con pedalata assistita, prese elettriche multiple e tutte le tipologie di prolunghe, montascale per diversamente abili, apparecchiature di automazione per cancelli, tende e chiusure elettriche etc.

Per la gestione dei RAEE vige il principio di responsabilità del Produttore, ovvero il soggetto che immette per primo (produce, importa o commercializza con il proprio marchio) apparecchiature elettriche ed elettroniche sul territorio italiano. Il sistema introdotto dalla normativa è improntato sulla responsabilità dei "produttori" (ossia dei primi importatori o fabbricanti) ai quali si chiede di organizzare e finanziare la raccolta e la gestione dei rifiuti delle apparecchiature elettriche ed elettroniche che immette sul mercato.

In questa maniera il Produttore è tenuto a farsi carico in via collettiva (cioè in proporzione alla rispettiva quota di mercato) del finanziamento e della gestione di un sistema di riciclo dei prodotti una volta a fine vita e si completa solo nel momento in cui questi, ormai diventati rifiuti, sono stati trattati e trasformati in materie prime secondarie.

In un ambito così complesso, l'organizzazione della filiera diviene un aspetto fondamentale nella progettazione di un sistema integrato che gestisca in toto il fine vita dell'AAE.

MOTIVAZIONI STRATEGICHE PER LO SVILUPPO

Le attività industriali in essere riguardano in particolare i grandi elettrodomestici a fine vita anno-

verati nella categoria R1, R2 ed R3[2] per i quali il sistema di trattamento e riciclaggio è ben consolidato. Le linee di lavorazione comprendono operazioni di messa in sicurezza, disassemblaggio, frantumazione, selezione dei materiali recuperabili e smaltimento delle sostanze pericolose.
I materiali recuperabili sono generalmente suddivisi in macro-categorie che determinano le linee dei successivi trattamenti: mediante una prima fase di smontaggio effettuata nei centri autorizzati, si separano metalli ferrosi, metalli non ferrosi, plastiche, vetro e componenti di maggior valore aggiunto. I materiali non recuperabili vengono smaltiti, i materiali riciclabili vengono rivenduti ad altri operatori sul mercato delle materie prime seconde, mentre i componenti o i beni suscettibili di rigenerazione vengono conferiti a produttori od operatori terzi per le necessarie operazioni di ricondizionamento.
A differenza di quanto accade generalmente negli altri paesi industrializzati, la tendenza della imprenditoria nazionale che si occupa di riciclo è di fermarsi alle prime fasi del processo di trattamento e recupero, cioè quelle decisamente più semplici ma anche meno remunerative, lasciando ad operatori solitamente oltre i nostri confini nazionali il compito di recuperare la parte "nobile" del rifiuto, che nel caso specifico dei RAEE è costituita dalle schede elettroniche, ricche di metalli di valore quali oro, argento, palladio e rame. È prassi comune che negli impianti di trattamento, laddove siano presenti nei RAEE componenti che contengono metalli preziosi o di elevato valore commerciale, non si provveda direttamente al recupero in situ, ma ci si limiti alla loro separazione ed al commercio verso l'estero (soprattutto in Nord Europa) dove esistono impianti di recupero specializzati.

Per quanto riguarda i materiali plastici, gli ostacoli al passaggio ad un modello più circolare sono dovuti all'esistenza di stalli normativi (ad es. riguardanti le quantità di ritardanti di fiamma bromurati ammesse nelle plastiche riciclate) e tecnologici (ad es. sistemi di riconoscimento veloce di alcuni tipi di plastiche): sebbene vi siano sforzi locali per migliorare la raccolta e il riciclaggio delle materie plastiche, la relativa catena del valore è ancora troppo frammentata e la plastica riciclata dai RAEE sembra essere ancora poco attraente per l'utente finale.
Per la collettività la mancata valorizzazione ottimale dei RAEE all'interno del sistema economico rappresenta un grave danno dovuto all'emorragia di risorse strategiche che l'Italia non possiede in quanto il suo sottosuolo è molto povero di materie prime (metalli preziosi, terre rare, materiali critici, rame, alluminio, etc.), ciò si traduce in perdita di fette di mercato e di quanto ne consegue in termini occupazionali, economici e sociali.

2 I RAEE sono per comodità classificati nei seguenti raggruppamenti:

- R1 – Apparecchiature refrigeranti, per es. frigoriferi, congelatori, apparecchi per il condizionamento
- R2 – Grandi bianchi, per es. lavatrici e lavastoviglie
- R3 – TV e monitor, per es. televisori, monitor di computer
- R4 – PED CE ITC, apparecchiature illuminanti e altro, per es. pannelli fotovoltaici, aspirapolvere, macchine per cucire, ferri da stiro, friggitrici
- R5 – Sorgenti luminose, per es. neon, lampade a risparmio, a vapori di mercurio, sodio, ioduri.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Il riciclo di metalli ferrosi, non ferrosi e vetro provenienti dallo smantellamento dei RAEE rientra in una filiera già consolidata. Le maggiori criticità per la realizzazione di un sistema integrato di gestione in toto del fine vita dell'AAE riguardano invece soprattutto:

A) l'assenza sul territorio di impianti per il recupero di metalli preziosi e/o strategici dai componenti di elevato valore aggiunto
B) la lacuna tecnologica riguardante la valorizzazione dei materiali plastici non differenziabili

Per quanto riguarda il punto A), le tecnologie disponibili per il recupero di metalli preziosi da RAEE sono fondamentalmente di due tipologie:

- trattamento termico – pirometallurgia
- trattamento ad umido – idrometallurgia e loro opportune combinazioni.

Trattamento termico - pirometallurgia

Gli impianti pirometallurgici sono presenti soprattutto nei paesi del nord Europa che vantano una tradizionale esperienza nell'industria siderurgica e quindi facilitati nella riconversione di impianti preesistenti. La pirometallurgia comprende un complesso di operazioni che hanno lo scopo di recuperare il metallo per via diretta attraverso la riduzione termica, oppure indirettamente attraverso una metallina che in seguito a ulteriori trattamenti può fornire il metallo che interessa. La riduzione termica e la produzione delle metalline si effettua tramite la fusione/ossidazione della matrice di partenza (ad es. schede di computer) in un forno convertitore: le elevate temperature di esercizio che devono essere raggiunte in tali impianti si ottengono per combustione di comuni combustibili fossili o tramite torce al plasma. Problemi sorgono relativamente ai sistemi di movimentazione dei combustibili fossili solidi che comportano emissioni di polveri e rilascio di metalli, e alla produzione di fumi di combustione contenenti gas acidi e diossine a causa della presenza di cloro e altre sostanze chimiche nelle plastiche. Queste condizioni estreme rendono i trattamenti termici di difficile gestione sia in termini economici che tecnici, tenendo conto delle sempre più restrittive norme ambientali e dei costi dell'energia. La pirometallurgia non permette inoltre di recuperare in via diretta i metalli presenti in piccole quantità che migrano nelle scorie che quindi devono essere ulteriormente trattate. Questo tipo di processo per essere sostenibile deve lavorare grandi quantità di materiale spesso non disponibili nel solo ambito nazionale ma da reperire anche in aree geografiche molto distanti dagli impianti (vedere ad es. l'impianto da 250.000 ton/anno della Umicore ad Hoboken in Belgio).

Tecnologie ad umido - idrometallurgia

Con il termine "idrometallurgia" si identificano l'insieme delle tecniche chimiche e chimico-fisiche di trattamento in fase liquida di materiali solidi quali minerali, sottoprodotti di lavorazioni industriali o residui di varia natura, mirate al recupero dei metalli in essi presenti. Tali tecnologie trovano campo di applicazione con enormi potenzialità di espansione ad esempio nel recupero di materiali critici o preziosi da RAEE.

A scopo semplificativo l'idrometallurgia può essere distinta in due principali operazioni:

Dissoluzione del solido (detta leaching o lisciviazione): consiste nel processo di estrazione solido/liquido che avviene facendo reagire il solido da trattare con un'opportuna soluzione capace di dissolvere alcuni (o tutti) i componenti e renderli stabili nella soluzione stessa.
Separazione e purificazione del metallo: dal processo di lisciviazione si ricava una soluzione contenente gli ioni metallici di interesse contaminata da molte altre impurezze che deve essere trattata in maniera opportuna con una serie di operazioni chimiche e/o chimico-fisiche per ottenere i metalli nella forma e nel grado di purezza desiderato.
L'alta selettività che si può raggiungere tramite queste tecniche separative permette il trattamento di metalli con proprietà molto simili consentendo di ottenere prodotti con un grado di purezza estremamente elevato e speciazione chimica definita. La relativa impiantistica è semplice, flessibile e facilmente automatizzabile con impianti ad impatto ambientale contenuto (i solventi laddove presenti sono usati a ciclo chiuso) e a basso consumo energetico (si opera prevalentemente a temperatura ambiente).
Attualmente in Italia le industrie che si occupano del recupero di metalli preziosi sono legate prevalentemente alla catena di produzione relativa ai distretti orafi e solo poche di esse sono potenzialmente in grado di affrontare il problema del trattamento delle schede elettroniche attraverso tecniche combinate piro-idrometallurgiche.
Per quanto riguarda l'innovazione in questo campo, l'ENEA sta testando su un impianto pilota denominato ROMEO (Recovery Of MEtal by hydrOmetallurgy) le potenzialità industriali di un processo innovativo dedicato al recupero di materiali ad alto valore da schede elettroniche attraverso tecnologia esclusivamente idrometallurgica.

Con riferimento al punto B), per la valorizzazione dei materiali plastici da RAEE, come già accennato, allo stato attuale non esiste un sistema industriale che riesca a discriminare decine di polimeri diversi distinti a loro volta per diverse formulazioni. Il recupero è possibile solo per gli involucri esterni costituiti principalmente da polimeri stirenici, con l'ulteriore difficoltà derivante dalla presenza di ritardanti di fiamma bromurati – di fatto pervasivi nelle plastiche di RAEE - che le norme europee mettono al bando.
Una strada percorribile sembra essere quella della Pirolisi, che consiste nella degradazione termica delle plastiche nel tentativo di ottenere prodotti quali olii combustibili e intermedi per la chimica di sintesi. I principali ostacoli ad una larga diffusione della pirolisi, oltre a quelli legati alle emissioni in atmosfera già esaminati per la pirometallurgia, sono dovuti alla difficoltà di raggiungere una qualità dei prodotti (gas, olio e polvere carboniosa) che sia competitiva nel mercato degli intermedi petrolchimici la quasi totalità di impianti industriali di questo tipo è concentrata in Giappone. Al caso giapponese si aggiungono esperienze di singoli di impianti di piccola taglia (dell'ordine di 5t/d) operanti in vari paesi asiatici. In Europa si segnala il caso di Techtrade in Germania: Hamm – Uentrop, (capacità di 100.000 t/a) e Burgau (capacità di 40.000 t/a); in Italia quelli di Terni (PG), Torregrande (OR) e Palmi (RC), con una capacità annuale, rispettivamente, di 28.500 t/a, 15.000 t/a e 8.000 t/a.
Ancora pochi sono sfortunatamente i produttori che indirizzano la ricerca verso la riciclabilità dei vari componenti attraverso i concetti di "Design for Recyclability", mentre in linea generale, gli sforzi innovativi degli attori coinvolti nel riciclo sono rivolti principalmente verso una maggio-

re automazione per lo smantellamento del RAEE tramite robotica - oggi in prevalenza effettuato manualmente -. Questa linea deve necessariamente essere affiancata dal miglioramento del riconoscimento automatico dei materiali per ottimizzare il processo di separazione automatico: approfondimenti in corso sono su tecniche di spettroscopia IR, X- r, LIBS.
Altre linee di ricerca sono rivolte al miglioramento delle caratteristiche chimico-fisiche dei materiali riciclati per sostituire adeguatamente i materiali vergini al fine di ottimizzare la sostenibilità delle risorse.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE PER LO SVILUPPO

Per quanto illustrato finora, è chiaro che diviene fondamentale investire risorse nella realizzazione di impianti idrometallurgici per i quali la tecnologia è già disponibile per il recupero delle preziose materie prime contenute nei RAEE. Si colmerebbe così il gap esistente con gli altri paesi del nord Europa creando anche una nuova filiera industriale a completamento dell'attuale ciclo di lavorazione che si ferma al commercio verso l'estero degli stock dei componenti selezionati e separati nei centri di raccolta e pretrattamento. Si stima che la realizzazione di un impianto con capacità di trattamento che consenta agevolmente di generare profitti (approssimativamente 1.500 t/a di schede elettroniche di computer a fine vita) richieda un investimento di circa 4 M€.
È difficile invece valutare gli sforzi ancora necessari a livello globale per trovare una soluzione al problema delle plastiche per sfruttare in pieno tutte le potenzialità dei RAEE come risorse di materie prime e di energia, poiché le sfide da affrontare sono ancora molte e con molte sfaccettature sia di tipo tecnico che normativo.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 4

TECNOLOGIE PER IL MIGLIORAMENTO DELL'IMPATTO AMBIENTALE DEGLI PNEUMATICI A FINE VITA

Nel 2017 si stima che siano stati prodotti 2.2 miliardi di pneumatici (Smithers Rapra - 'The Future of Global Tires to 2022') che vanno a costituire nel tempo i pneumatici a fine vita o pneumatici a fine uso (PFU).

Durante la vita dei pneumatici, la parte esterna della fascia battistrada è consumata e viene rilasciata nell'ambiente, spesso miscelata a particolato proveniente dal manto stradale: si parla di "tire & road wear particle" (TRWP).

Dal 2008 il "Tire Industry Project" nell'ambito del WBCSD ha promosso studi sull'impatto ambientale del TRWP: benchè non siano emersi finora dati particolarmente critici, tale materiale costituisce un impatto ambientale non trascurabile, stimabile in EU in 500.000 ton/anno.

In Italia, in particolare, nel 2016 sono stati generati più di 400.000 tonnellate di PFU. Dal 2003 l'Unione Europea ha stabilito il divieto allo smaltimento di pneumatici in discarica, entrato in vigore in Italia dal 2010 e da quella data non è più possibile smaltire i PFU in discarica. Si stima che in Italia si è arrivati nel 2016 a raccogliere ed inviare al recupero il 100% dei PFU generati (ETRMA - Used Tyres/ELT Management in Europe - Volumes Situation 2016).

In generale il recupero avviene secondo due diverse modalità:

- Recupero di energia (Tyre Derived Fuel). Il PFU è caratterizzato da un potere calorifico paragonabile a quello del carbone e ciò lo rende una fonte energetica largamente usata in tutto il mondo per soddisfare la domanda di settori industriali altamente "energivori", come cementifici o centrali di produzione di energia/vapore.
- Recupero di materiale (Tyre Derived Material). Attraverso impianti di recupero si sottopongono i PFU a processi meccanici di disgregazione per estrarre acciaio e gomma da riutilizzare come materia prima. Per triturazione successiva, la gomma viene ridotta nella forma di granuli e polverino. Questi possono essere riutilizzati in diversi campi: per la realizzazione di campi sportivi, per la produzione di asfalti modificati, per produrre pannelli insonorizzanti, materiali anti-vibranti e per la produzione di elementi di arredo urbano (dossi artificiali, delimitatori di traffico, cordoli). Può anche essere riciclato in nuove mescole per la produzione di articoli tecnici e, in minima parte, nelle mescole degli pneumatici. Infatti nei prodotti che devono assicurare elevate prestazioni in condizioni statiche e dinamiche, quali gli pneumatici, il polverino di gomma rappresenta una microinomogeneità della struttura della mescola e può avere effetti negativi sul comportamento strutturale della gomma.

MOTIVAZIONI STRATEGICHE PER LO SVILUPPO

Per migliorare l'impatto ambientale degli pneumatici a fine vita si possono seguire 3 approcci:

1. Sviluppare tecnologie per migliorare la qualità dei materiali ottenibili da PFU, che permettano di utilizzare nella manifattura di pneumatici i materiali derivati dai PFU stessi in misura molto superiore all'attuale.
2. Sviluppare tecnologie per ottenere pneumatici più leggeri e/o che si consumino di meno a pari prestazioni (ad es. RR, Noise, Wet & Dry Grip) e percorrenza: un pneumatico più leggero e più resistente all'abrasione comporterebbe un minore rilascio di particelle di gomma e la generazione di una minore massa di PFU
3. Sviluppare una tecnologia di pneumatico radicalmente nuova, che incorpori fin dal progetto il riciclo di gran parte del suo materiale (design for recyclability), e possibilmente sia anche molto resistente all'abrasione (ma sempre a pari prestazioni).

Riguardo le tecnologie per migliorare la qualità dei materiali ottenibili da PFU, un primo approccio è la cosiddetta "rigenerazione" della mescola da PFU.
Il processo di rigenerazione ha lo scopo di modificare la struttura della gomma usata per renderla idonea, una volta introdotta in una nuova mescola, alla successiva reazione di vulcanizzazione evitando che si comporti come un corpo estraneo inerte (seppure microdimensionato). In altre parole, un procedimento di rigenerazione capace di ricondurre il materiale il più possibile vicino alla struttura polimerica originale aumenta la possibilità di utilizzare volumi più elevati senza compromettere le prestazioni del manufatto finito.
La rigenerazione delle mescole avviene principalmente attraverso la parziale devulcanizzazione della gomma, tanto più efficace quanto più è associata ad una limitata degradazione della parte polimerica. Infatti i principali processi di produzione del rigenerato consistono nell'applicazione di lavorazioni termo-meccaniche al polverino di gomma, processi che spesso sono poco selettivi nei riguardi della rottura dei legami di reticolazione con conseguente rottura anche delle catene polimeriche e abbattimento del peso molecolare dei polimeri.
Il concetto di rigenerazione è, però, molto più ampio e può comprendere anche processi di funzionalizzazione chimica o compatibilizzazione fisica del polverino di gomma allo scopo di migliorarne la compatibilità all'interno di nuove mescole. I principali produttori di rigenerato da polverino di gomma da PFU si sono sviluppati in Asia.
Un secondo approccio per il riutilizzo dei materiali da PFU nelle mescole per pneumatici punta al recupero selettivo dei filler: la componente polimerica e le specie di basso peso molecolare sono trasformati attraverso un processo di "pirolisi" in idrocarburi, e dunque recuperate sotto l'aspetto energetico, lasciando come residuo una componente inorganica costituita essenzialmente da Carbon Black (CB) e Silice, che rappresentano tipicamente circa 1/3 del peso dello pneumatico e sono per la loro manifattura tra le sostanze a maggior impatto ambientale tra quelle usate per gli pneumatici stessi.
La sfida è ottenere dai processi di pirolisi materiali sufficientemente puri e ben caratterizzati da essere usabili in grande quantità negli pneumatici stessi.
Le tecnologie per ottenere pneumatici più leggeri e/o più resistenti all'abrasione sono innanzitutto tecnologie formulative, nell'ambito delle quali si sviluppano nuovi materiali e nuovi processi sia per la miscelazione dei componenti delle mescole, normalmente costituiti da numerose sostanze

di natura diversa, che per la realizzazione del prodotto finito. Nello sviluppo dei materiali, l'attività di ricerca sta esplorando sempre più in dettaglio l'interazione tra i diversi materiali, spostando l'attenzione da una risoluzione microscopica a quella nanoscopica, con l'obiettivo di comprendere e governare meglio a livello molecolare l'interazione tra le componenti delle mescole, in particolare tra polimeri e filler (Carbon Black, Silice e i nuovi Nanofiller).
Nuovi polimeri, nuovi filler e nuovi sistemi di compatibilizzazione tra polimeri e filler devono essere sviluppati in modo coordinato per raggiungere l'obiettivo di pneumatici più leggeri e più resistenti all'abrasione e possono portare ad una nuova tecnologia di pneumatico, disegnato per un più efficiente riciclo dei suoi componenti.
L'adozione dei principi della "circular economy" ed in particolare del "Design for Recyclability" in fase di progetto di un prodotto radicalmente nuovo potrebbe infine aprire la strada allo sviluppo di una soluzione di "pneumatico" quasi interamente riciclabile

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Come introdotto precedentemente, la maggior parte dei rigenerati commerciali sono prodotti mediante processi termo-meccanici in grado di devulcanizzare seppure parzialmente il materiale. Il prodotto così ottenuto può essere introdotto nelle mescole vergini in quantità maggiore rispetto al polverino corrispondente ma comunque limitato. Questa caratteristica non è valida per qualsiasi tipo di mescola, ancora oggi molte delle mescole utilizzate non sono in grado di accettare l'introduzione di rigenerato senza un'evidente degradazione delle prestazioni. In media la quantità di rigenerato che può essere introdotto in molte mescole per gli pneumatici, conservandone le prestazioni, si aggira intorno al 3-5%.

Con lo scopo di migliorare il rigenerato ed incrementare la quantità introdotta in mescola, sono stati messi in atto un po' in tutto il mondo, diversi sforzi diretti allo sviluppo di nuovi metodi di devulcanizzazione in grado di agire in modo più efficace e selettivo sulla rottura dei legami di reticolazione.
Sono state sperimentate metodologie che utilizzano microonde, ultrasuoni o fasci elettronici associate spesso all'introduzione di alcuni additivi chimici allo scopo di fornire l'energia necessaria alla desulfurizzazione della gomma limitandone la degradazione.
Negli ultimi anni ci si è anche orientati verso l'utilizzo di micro-organismi in grado di convertire ed estrarre lo zolfo coinvolto nei legami di reticolazione. Non risulta che questi nuovi metodi, siano stati industrializzati e ad oggi, non esistono prodotti commerciali provenienti da nuovi processi, con caratteristiche migliorate.
Uno sviluppo in questa direzione prevede la comprensione dei meccanismi che inducono una maggiore compatibilità del rigenerato rispetto alle mescole vergini e l'individuazione di processi industriali in grado di modificare il polverino da PFU, fino ad uno stato di materia prima seppur secondaria più simile alla mescola vergine. L'impatto ambientale ed economico legato all'ampliamento dei settori di utilizzo della gomma da PFU e alla sostituzione di materie prime essenziali (gomma naturale) dovrà essere valutato.
Anche i processi di pirolisi sono stati sviluppati recentemente, soprattutto in USA, ma al momento i filler recuperati sono utilizzabili in modo sostanziale solo in sostituzione dei gradi di CB meno

nobili, che vengono utilizzati nelle poche parti del pneumatico dove le performance meccaniche non sono estreme.
Rimane necessario un ulteriore salto qualitativo dei materiali recuperati perché possano essere usati in grande quantità negli pneumatici stessi.

Lo sviluppo di pneumatici più leggeri e più resistenti all'abrasione è un obiettivo generale dei produttori di pneumatici, e nell'ultimo decennio il peso medio degli pneumatici è sicuramente diminuito, attraverso un miglioramento della tecnologia di manifattura e l'ottimizzazione delle formulazioni e materiali di rinforzo: sono ora necessari nuovi materiali per poter ulteriormente migliorare tali aspetti.
Nuovi concetti di pneumatici sono stati proposti da aziende estere, inclusi concept basati sulla stampa 3D di materiali rinnovabili e riciclabili, anche se la realizzazione di un prodotto industriale che rispetti tali caratteristiche richiede ancora moltissimo lavoro di sviluppo, e dunque rappresenta una reale possibilità di apportare valore a questo tipo di nuovo prodotto.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE PER LO SVILUPPO

Le attività di sviluppo lungo le 3 direttrici identificate devono essere orientate verso lo studio chimico-strutturale dei materiali coinvolti, lo sviluppo delle tecniche di produzione più idonee, lo studio di fattibilità in pilota o semiscala e l'analisi dell'impatto delle tecnologie applicate.
Lo sviluppo richiede un approccio multidisciplinare e richiede competenze specialistiche ed importanti investimenti. Per portarlo avanti efficacemente è indispensabile definire una struttura che possa coinvolgere ed integrare in un'unica filiera gli Enti di Ricerca, i laboratori universitari e le Industrie interessate.
Una stima di budget per almeno uno degli approcci delineati è dell'ordine dei 20 milioni di Euro.

POTENZIALE RICADUTA OCCUPAZIONALE

Lo sviluppo di tecnologie capaci di migliorare l'impatto ambientale degli pneumatici ha potenziali ricadute occupazionali a due livelli:

- Direttamente nell'industria del recupero degli pneumatici a fine vita: il recupero dell'energia implica processi relativamente semplici, e scarso valore aggiunto, mentre il recupero di materiali nobili avrebbe un valore aggiunto superiore e richiederebbe (a pari quantità di PFU processati) una forza lavoro più grande, per lo sviluppo e l'affinamento dei processi aggiuntivi richiesti così come a regime per la loro gestione e l'assicurazione della qualità dei prodotti in uscita.
- Indirettamente nell'industria del pneumatico: la capacità di generare pneumatici complessivamente più sostenibili sarebbe un elemento distintivo nel mercato e permetterebbe quindi di aumentare la quota di mercato, richiedendo più manodopera per la manifattura di tali pneumatici.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 5

TECNOLOGIE PER IL RECUPERO SELETTIVO DI SURNATANTE DA ACQUA DI FALDA (E-HYREC®)[3]

Gli sversamenti di prodotti petroliferi, da rilasci accidentali o da perdite di serbatoi e contenimenti, comportano un serio rischio per la salute umana a causa della derivante contaminazione delle risorse naturali e delle falde acquifere, provocando impatti negativi anche dal punto di vista economico.

La rimozione del prodotto sversato da parte della società responsabile dalla superficie del terreno deve essere immediata. Meno visibile e meno ovvio è invece l'effetto che tale rilascio ha nel sottosuolo. Dipendentemente dalla quantità di prodotto rilasciato e dalle condizioni ambientali, la sostanza può percolare dalla superficie nel sottosuolo, fino a raggiungere eventualmente la tavola d'acqua della falda acquifera. In questo caso, a differenza di quanto accade in superficie, gli interventi di rimozione del prodotto risultano più complessi. Data la natura problematica della contaminazione del sottosuolo, e le conseguenti sfide per la bonifica dei suoli e delle acque di falda, risulta evidente come sia necessario l'intervento prioritario della rimozione della sorgente di contaminazione prima di iniziare un qualsiasi intervento di bonifica della falda. In assenza di un tale intervento preventivo le operazioni di bonifica si prolungano per un tempo difficile da definire, rendendo di fatto l'intervento poco efficace da un punto di vista ambientale ed economicamente poco sostenibile per il soggetto interessato.

Negli anni sono state spese ingenti somme sia per la ricerca sia per le attività di campo, ai fini di una comprensione del comportamento di fasi immiscibili nel sottosuolo, e ancor più risorse sono state impiegate nel tentativo di bonificare.

Una volta che il prodotto raggiunge la falda acquifera forma la cosiddetta fase liquida non acquosa leggera, LNAPL[4] nell'acronimo inglese, che a causa della sua densità galleggia sopra la falda e ne segue le oscillazioni stagionali. Il LNAPL costituisce un residuo poco mobile e difficilmente raggiungibile per la rimozione. Inoltre, sebbene le sostanze che lo compongono, generalmente idrocarburi, siano relativamente poco solubili in acqua, il rilascio continuo in falda di questi contaminanti è comunque sufficiente a rendere la risorsa non più utilizzabile, costituendo di fatto una sorgente a lungo termine di contaminazione. Quale risultato di questa azione si generano pennacchi di contaminazione anche molto estesi.

Nei decenni passati le tecniche di recupero del LNAPL sono evolute dal semplice pompaggio o recupero idraulico, o la rimozione manuale tramite bailer, agli skimmer convenzionali, passivi e attivi, e ai sistemi selettivi. In funzione della tecnica di rimozione utilizzata, più o meno selettiva, al prodotto emunto è associata una quota parte di acqua di falda che può anche essere significa-

3 Eni Hydrocarbon Recovery

4 Light Non-Aqueous Phase Liquid

tivamente maggiore del volume di prodotto stesso. Tale volume di acqua comporta un aggravio di costi operativi dovuti allo smaltimento come rifiuto.

MOTIVAZIONI STRATEGICHE PER LO SVILUPPO

Centrale per la comprensione della necessità di bonificare è la relazione stretta tra la rimozione della massa di LNAPL e la riduzione del rischio, in particolare riguardo gli impatti attesi sulla concentrazione e durata nel tempo (longevità) del plume di contaminazione a valle idrogeologica della sorgente.

Ancora oggi gli interventi più comunemente attuati per rimuovere il prodotto surnatante dalla falda acquifera coinvolgono l'emungimento di un ingente quantitativo di acqua, che spesso supera il 90% in volume sul totale. Il prodotto viene quindi allontanato come emulsione in acqua e non così di frequente si utilizzano metodi di separazione della frazione organica dalla fase acquosa. Il risultato di questa pratica è la produzione di enormi volumi di rifiuto che devono essere smaltiti ai quali è associato un costo significativo, che fa aumentare notevolmente l'impatto economico di un intervento di bonifica o messa in sicurezza della falda.

L'uso di materiali porosi capaci di filtrare la fase organica attraverso una permeazione selettiva può rappresentare un approccio alternativo nei processi di separazione acqua-organico e quindi di bonifica delle falde. Nella fase di lavoro l'organico permea attraverso i pori del filtro, posto a contatto con la miscela, e l'acqua è respinta dalla superficie; la permeazione selettiva si basa sulle caratteristiche del materiale che è idrofobico/superidrofobico e oleofilico. In questo ambito la ricerca Eni ha sviluppato un materiale proprietario ad alte prestazioni e selettività, costituito da un filtro di acciaio sinterizzato modificato con un coating superficiale di un polimero, il polidimetilsilossano (PDMS), che conferisce caratteristiche di idrofobicità e oleofilicità. Il materiale è in grado di separare, tramite permeazione selettiva, il LNAPL dall'acqua, consentendo la raccolta della fase organica. Il filtro può essere accoppiato ad un sistema di raccolta e recupero del prodotto surnatante permeato, in altri termini un serbatoio collegato ad una pompa di rilancio. Inoltre l'utilizzo di un sistema automatico di posizionamento all'interfaccia acqua/olio ottimizza le prestazioni del filtro e consente di seguire le oscillazioni della falda senza perdita di selettività, a differenza degli apparecchi tradizionali.

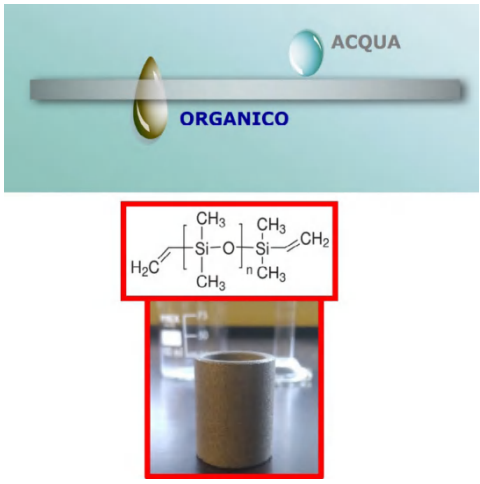


FIGURA 29. IL PRINCIPIO DI PERMEAZIONE SELETTIVA DI E-HYREC® (SOPRA) E IL FILTRO IDROFOBICO ENI CON LA FORMULA DEL PDMS (SOTTO).

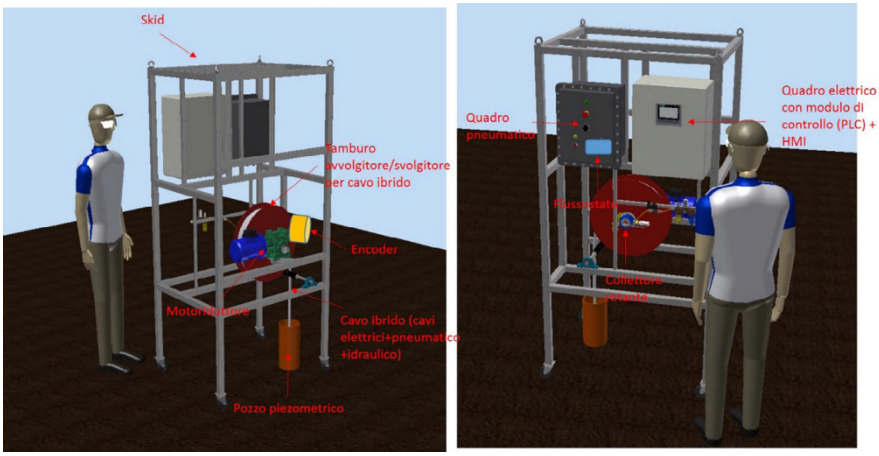


FIGURA 30. IL SISTEMA DI MOVIMENTAZIONE, GESTIONE E CONTROLLO DI E-HYREC®, POSTO IN SUPERFICIE A BOCCA POZZO.

I vantaggi di un dispositivo di recupero e-hyrec® sono:

- Bonifica della falda da miscele apolari aventi densità inferiori all'acqua (LNAPL). Gli idrocarburi e tutto ciò che non è polare e galleggia in acqua può esser rimosso attraverso il filtro selettivo. La velocità di filtrazione è funzione della viscosità del liquido recuperato.
- Possibile riutilizzo del surnatante come materia prima-seconda (MPS). In considerazione dell'alta selettività il prodotto recuperato contiene una bassissima percentuale di acqua (<1% v/v), che ne consentirebbe l'uso quale combustibile o per successiva valorizzazione attraverso processi di trattamento. Nel primo caso si otterrebbe una valorizzazione energeti-

ca del prodotto recuperato. Un tale impiego risulta allo stato attuale difficilmente percorribile a causa di limiti normativi. In considerazione della possibilità di una bonifica così selettiva, non ottenibile con le attuali tecniche, sarebbe probabilmente necessaria una revisione della legislazione per facilitare il recupero energetico. Nel secondo caso la variabilità della composizione dell'emunto non ne consente una reintroduzione diretta nella filiera produttiva. Anche nel caso di smaltimento il recupero selettivo consente una notevole riduzione dei volumi emunti e quindi dei costi di smaltimento.

- Riduzione dell'acqua raccolta. L'alta selettività dei filtri idrofobici permette di inviare in superficie solo una piccolissima frazione di acqua (< 1% v/v). In questo modo si riducono i costi di smaltimento della fase acquosa.
- Il processo è semplice, non esistono parti in movimento, quindi la manutenzione risulta minima e il consumo energetico ridotto.
- Automazione. L'utilizzo di un'adeguata sensoristica, di organi di movimentazione idonei e l'accoppiamento di questi con un sistema di controllo opportunamente programmato consente di raggiungere un elevato grado di automazione. Questa caratteristica da un lato permette un'ottimizzazione della prestazione del processo di recupero, da un altro porta alla riduzione dei costi operativi legati al personale tecnico e dei costi di manutenzione.

Conclusi con successo i test dei dispositivi R&D, è stata avviata la fase di produzione e commercializzazione di e-hyrec® da parte di una ditta terza con cui Eni ha siglato un accordo di licenza.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Nonostante esistano diverse classi di tecnologie potenzialmente applicabili al trattamento di contaminanti in fase separata (LNAPL), che saranno di seguito elencate e descritte, l'esperienza acquisita in diversi siti distribuiti su scala nazionale evidenzia la difficoltà di individuare soluzioni tecnologiche che consentano di ottenere prestazioni soddisfacenti in tempi ragionevoli, garantendo contemporaneamente la sostenibilità economica ed ambientale dell'intervento.
Esistono diverse tecnologie disponibili per il trattamento di bonifica dell'acqua di falda contaminata da LNAPL.

- Pump&treat: consiste nell'emungimento dell'acqua di falda contaminata mediante l'utilizzo di pompe sommerse. L'aspirazione della pompa è collocata all'interfaccia tra acqua e olio e raccoglie una miscela delle due fasi. Il trattamento di separazione delle due fasi e recupero/smaltimento delle stesse viene effettuato successivamente su piano campagna. Nella maggioranza dei casi i due flussi, acqua di falda e prodotto separato, sono gestiti come rifiuto e quindi avviati ad appropriato smaltimento, con i correlati costi. Questa tecnica produce grandi quantitativi di acqua estratta, superiori al 50% sul volume totale.
- Soil flushing: si tratta di un approccio tecnologico in situ che consente il "lavaggio" del suolo senza la rimozione dello stesso ed il successivo trattamento della soluzione di lavaggio in appositi impianti. Il soil flushing prevede le seguenti fasi operative:
  – iniezione, nella zona contaminata, di una soluzione acquosa addizionata con agente "pulente";

  - emungimento in superficie della miscela di acqua di falda e elutriato (miscela della soluzione flussata e contaminanti);
  - trattamento del liquido raccolto per riutilizzo o bonifica. Per il trattamento si utilizzano soluzioni di tensioattivi, solventi, acidi, basi, ossidanti o agenti chelanti; la loro funzione è quella di migliorare l'efficienza di recupero aumentando la solubilità in acqua del contaminante o la sua mobilità (molti inquinanti organici hanno bassa solubilità in acqua e tendono ad adsorbirsi sulle rocce del suolo). L'utilizzo di chemicals per il trattamento complica sia l'impiantistica che la preparazione dell'intervento, necessitando dell'installazione di appositi pozzi di iniezione e di recupero.
- Dual pump: tale approccio fa uso di due pompe indipendenti, inserite nel pozzo di recupero. La prima è posizionata sul fondo del pozzo per estrarre solo acqua e deprimere la falda, raggiungendo così un duplice effetto. Il primo è di attuare un barrieramento idraulico alla migrazione del plume di contaminazione disciolto, il secondo è di richiamare nel pozzo la fase organica, generando un cono di depressione. La seconda pompa, spesso costituita da uno skimmer attivo, è posizionata sulla superficie del liquido al livello del LNAPL e raccoglie solo l'organico. In funzione del metodo di recupero l'approccio dual pump non è in grado di rimuovere completamente il surnatante. Le migliori prestazioni non consentono una rimozione inferiore a qualche mm di prodotto residuo. Inoltre il sistema risulta poco selettivo in presenza delle fluttuazioni della falda, peraltro frequenti e ampie, perché basato sull'uso di un galleggiante avente una corsa limitata. Le percentuali di acqua estratta variano in genere tra il 50% e il 90% sul volume totale.
- Skimmer selettivi: costituiscono una evoluzione del sistema skimmer di recupero del prodotto surnatante; impiegano materiali oleofilici e idrofobici in grado di consentire la permeazione del prodotto. Questo approccio dovrebbe consentire di recuperare la fase organica dalla falda con un contenuto di acqua inferiore rispetto agli altri metodi, ma di fatto mostrano bassa selettività a causa del continuo contatto con la fase acquosa e per la loro caratteristica di sistemi manuali. Le percentuali di acqua estratta sono in genere superiori al 50%sul volume totale. Richiedono frequente manutenzione e controllo continuo da parte dell'operatore.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 6

CAMPIONATORI PASSIVI PER IL MONITORAGGIO DELLA COMPONENTE VOLATILE (VOC) DELLE MATRICI AMBIENTALI

L'innovazione nel campo della determinazione dei contaminanti nelle matrici ambientali rientra tra le priorità del settore delle bonifiche dei siti contaminati ai fini di una corretta identificazione della reale sussistenza di problematiche ambientali ed al conseguente corretto uso delle risorse economiche necessarie per la bonifica, in un'ottica di sostenibilità ambientale.
In un contesto territoriale che vede in Italia una scarsa disponibilità di aree per nuove iniziative industriali, i cosiddetti "siti inquinati", che occupano vaste aree del nostro Paese, possono diventare una opportunità ideale di rilancio e riutilizzo del territorio promuovendo la loro bonifica per farne occasione per attività produttive o civili. In Italia le bonifiche, stentano ad essere realizzate, a dispetto delle rilevanti risorse impiegate. Le ragioni sono molteplici, legate alle obiettive difficolta nell'applicazione delle procedure e prescrizioni stabilite per legge (quest'ultima oggetto di numerose variazioni negli ultimi anni), ma anche per oggettive difficoltà tecniche nel traguardare gli obiettivi di bonifica definiti dalla normativa.
Nel nostro Paese gli obiettivi di bonifica sono definiti attraverso parametri molto cautelativi rispetto agli altri paesi occidentali. Tutto ciò ha forti ripercussioni sulla scelta delle tecnologie di bonifica da implementare e porta il più delle volte a scelte radicali e costose, come quelle dello scavo e smaltimento in discarica. Si rileva, pertanto, un forte divario fra i costi che gli operatori italiani sono chiamati a sostenere per le bonifiche, decisamente superiori rispetto a quelli degli altri paesi europei.
In particolare nell'ambito della caratterizzazione dei siti di interesse, il monitoraggio delle matrici aeriformi (soil gas survey, misure di flusso, monitoraggio dell'aria ambiente) è sempre più utilizzato nei procedimenti di bonifica dei siti contaminati ai sensi della Parte Quarta del Titolo V del D.Lgs. 152/06 e s.m.i. sia in fase di caratterizzazione ambientale, sia per l'esecuzione dell'analisi di rischio sito-specifica, sia per la progettazione degli interventi. Recentemente ISPRA ed ARPA all'interno di un gruppo di lavoro del Sistema nazionale di protezione dell'ambiente (SNPA) hanno elaborato un approccio metodologico condiviso per il monitoraggio del soil gas nei procedimenti di bonifica ed hanno pubblicato il documento "Progettazione del monitoraggio di vapori nei siti contaminati" che ha come finalità la definizione di una procedura operativa condivisa a livello nazionale per l'utilizzo dei dati derivanti da misure di soil gas all'interno dell'Analisi di Rischio (AdR) dei siti contaminati.

MOTIVAZIONI STRATEGICHE PER LO SVILUPPO

La volatilizzazione di composti organici volatili (VOC) in ambienti outdoor ed indoor risulta una delle vie di migrazione più critiche nella maggior parte dei siti contaminati. Tale problematica risulta essere ancora molto attuale, in quanto diversi studi effettuati negli ultimi anni hanno eviden-

ziato che i modelli attualmente più utilizzati a livello nazionale ed internazionale (ad es. il modello di Johnson & Ettinger, 1991) possono condurre, specialmente per contaminazioni da idrocarburi, a sovrastime dell'effettivo impatto dei VOC. Secondo quanto messo in luce da questi studi, tali sovrastime sono da ricondurre principalmente al fatto che tali modelli, derivanti da studi precedenti effettuati sul radon, non tengono conto di alcuni processi di attenuazione naturale che possono intervenire durante il trasporto dei contaminanti nel sottosuolo e della effettiva (bio-) disponibilità del contaminante.

Per superare questa limitazione, così come suggerito nelle linee guida ISPRA (2008), si può ricorrere alla verifica della rappresentatività del modello di trasporto utilizzato mediante campagne di indagine soil-gas. In particolare nelle linee guida ISPRA (2008) viene indicato che "laddove l'applicazione di tali equazioni determini un valore di rischio non accettabile per via di esposizione inalazione di vapori outdoor e/o indoor, dovranno essere eventualmente previste campagne di indagini (misure di soil-gas, campionamenti dell'aria indoor e outdoor) allo scopo di verificare i risultati ottenuti mediante l'applicazione del modello di analisi di rischio".

Attualmente le indagini soil-gas vengono effettuate mediante due sistemi di campionamento: le sonde soil-gas (nesty probes) e le camere di flusso. Il loro utilizzo è previsto da diverse linee guida emanate da diverse agenzie regionali per la protezione dell'ambiente, che ne definiscono le condizioni e modalità di applicazione. Da ciò risultano dei vincoli alla loro applicazione. Per le sonde soil gas questi sono legati essenzialmente alla profondità della sonda dal piano campagna ed alla sua distanza dalla tavola d'acqua sotterranea, che in alcuni casi non ne rendono possibile l'utilizzo. Per le camere di flusso, i limiti applicativi sono essenzialmente legati alla presenza di pavimentazione e alla loro non idoneità per la caratterizzazione del rischio legato ad esposizione in ambienti indoor.

Considerati gli aspetti critici di queste tecniche di campionamento, negli ultimi anni una particolare attenzione è stata rivolta a tecniche di campionamento in grado di valutare direttamente e sperimentalmente la frazione (bio)disponibile da utilizzare nell'ambito della procedura di analisi di rischio. Tra le varie tecniche di monitoraggio emergenti, l'uso dei campionatori passivi sta diventando un'opzione sempre più attraente in quanto permette di valutare in maniera diretta la frazione mobile presente nella matrice contaminata.

I metodi di campionamento passivo non necessitano di alcun sistema di aspirazione ma sfruttano il processo fisico della diffusione molecolare degli inquinanti sulla base del gradiente di concentrazione tra il mezzo da monitorare (ad es. acqua o aria) e un sistema adsorbente presente nel campionatore.

Le tecniche di campionamento passivo risultano già ben consolidate e applicate per il monitoraggio dei contaminanti in fase disciolta nelle acque sotterranee e nei sedimenti. Per il monitoraggio delle sostanze in fase aeriforme, le prime applicazioni di sistemi di campionamento passivo risalgono già agli anni '70 (vedi ad es. Palmes 1973) e nei primi anni '80 hanno iniziato ad essere largamente utilizzati nell'ambito dell'igiene industriale (vedi ad es. Brown et al., 1981; Fowler, 1982; Seifert e Abraham, 1983; Lewis et al., 1985; Moore 1987). Negli ultimi anni a livello nazionale ed internazionale si stanno mettendo a punto dei sistemi di monitoraggio del soil gas basati sul campionamento passivo.

I principali vantaggi dei campionatori passivi rispetto ai metodi di campionamento attivo tradizionali sono i seguenti: (1) realizzazione semplice ed economica (non richiedendo sistemi di aspirazione, l'installazione risulta tipicamente più semplice rispetto ai metodi attivi) ; (2) minore variabilità dei dati e ridotto potenziale di errori umani o di bias di campionamento; (3) capacità di campionare suoli con bassa e alta permeabilità e / o bassa o alta umidità del suolo; (4) facilità di utilizzo in aree ad accesso limitato, in terreni vadosi, inoltre i campionatori passivi vengono generalmente utilizzati per tempi di campionamento più lunghi (tipicamente superiori a 24 ore) rispetto al campionamento attivo, consentendo di ottenere dati con una minore variabilità rispetto alla durata convenzionale più breve dei metodi di campionamento tradizionali. Pertanto i risultati ottenuti con tali sistemi possono essere utili per valutare l'esposizione media ponderata a lungo termine con un numero inferiore di campioni rispetto ai metodi convenzionali. Tuttavia anche questi sistemi di campionamento passivo che operano nella zona di cattura lineare cioè, nella fase iniziale del campionamento, in cui gli inquinanti vengono adsorbiti sul materiale presente nel campionatore con un tasso che è direttamente proporzionale alla concentrazione del contaminante nella matrice, presentano alcune criticità. In particolare i campionatori con alti coefficienti di uptake (UR) possono condurre ad un adsorbimento troppo rapido dei contaminanti presenti in corrispondenza della zona campionata rispetto al tempo necessario ai contaminanti per tornare in una condizione di equilibrio, con un conseguente "svuotamento" dei pori e sottostima delle concentrazioni attese nel soil gas (fenomeni di "starvation"). Inoltre per stimare la concentrazione nel soil gas è necessario conoscere, oltre che alla massa di contaminante adsorbito nel sistema adsorbente e alla durata di campionamento, il coefficiente di uptake (UR). Tale coefficiente dipende dalla geometria del dispositivo di campionamento e dal coefficiente di diffusione specifico di ciascun contaminante e non è sempre disponibile, pertanto, al fine poter utilizzare questa tecnica per una stima quantitativa delle concentrazioni nel soil gas è necessario prevedere delle prove di calibrazione in campo mediante confronto con metodi di campionamento attivo. In assenza di tali coefficienti sito-specifici tali dati possono essere utilizzati per stime qualitative o semi-quantitative.

Per superare le criticità descritte Eni, in collaborazione con Syndial, MIT e Università degli studi di Roma "Tor Vergata", ha messo a punto una metodologia innovativa di monitoraggio che utilizza un film di polietilene per il campionamento passivo dei composti organici volatili nei soil gas, ma che si basa su un principio di funzionamento diverso rispetto agli attuali campionatori passivi. In particolare i campionatori vengono esposti nella matrice per tempi sufficienti a garantire l'instaurarsi di condizioni di equilibrio tra la matrice e il sistema adsorbente. In questo caso per determinare la concentrazione nella matrice, è necessario conoscere il coefficiente di ripartizione tra il sistema adsorbente e la matrice campionata (nel caso specifico il coefficiente di ripartizione tra il sistema adsorbente e l'aria).

In precedenza, Eni aveva messo a punto una nuova tecnica di campionamento basata sull'utilizzo di campionatori passivi costituiti da film di polietilene a bassa densità (LDPE) ed è stata applicata per la valutazione della frazione (bio-) disponibile di DDx in sedimenti lacuali, consentendo di ottenere risultati riproducibili nell'acqua interstiziale e nella colonna d'acqua. Il confronto con i dati ottenuti esponendo un mollusco d'acqua dolce (Unio) nello stesso sito ha evidenziato che i film

in LDPE rappresentano dei buoni proxy per valutare l'effettiva (bio-)disponibilità dei DDx. Questa metodologia è stata riconosciuta ufficialmente attraverso la sua pubblicazione nel Notiziario dei Metodi Analitici IRSA-CNR» vol.1, November 2015.
Nel presente lavoro viene descritto lo sviluppo e l'applicazione dei film in LDPE come campionatori passivi per la valutazione della concentrazione di inquinanti volatili nel soil-gas di un sito contaminato. L'utilizzo di questo sistema di campionamento potrebbe infatti consentire di superare alcune delle limitazioni dei sistemi attivi, estendendo la misura del soil gas anche alle condizioni attualmente non possibili per i sistemi tradizionali di campionamento.
In particolare, lo studio è stato condotto utilizzando film di polietilene a bassa densità (LDPE) di spessore 70 mm e 100 mm, che rappresentano uno dei polimeri più semplici ed economici per questo tipo di applicazione (Lohmann et al.2012). Dalle sperimentazioni di laboratorio effettuate è stata verificata l'applicabilità di tale sistema di campionamento per la stima della concentrazione di BTEX (Benzene, toluene, etilbenzene e xileni) nel soil-gas. I risultati sono stati utilizzati per la stima dei coefficienti di ripartizione dei contaminanti target tra soil-gas e film di LDPE, necessari per interpretare i dati ottenuti dai campionatori passivi esposti in campo.
Il principale vantaggio rispetto ai campionatori passivi tradizionali, è che con i campionatori passivi che operano in condizioni di equilibrio, per determinare la concentrazione nel soil gas è sufficiente, nota la concentrazione degli analiti nel polietilene al termine dell'esposizione, utilizzare un coefficiente di ripartizione polietilene-aria (Kpea).
Le sperimentazioni attualmente effettuate in scala di laboratorio su campioni di suolo prelevati da alcuni siti di proprietà Eni mettono in evidenza una buona accuratezza del metodo di campionamento passivo. Per l'applicazione in campo di tale tipologia di campionatori, sono stati messi a punto e testati dei sistemi ad infissione diretta (direct push) che consistono nell'utilizzo di aste in acciaio inossidabili finestrate alle profondità di interesse al cui interno vengono inseriti film di polietilene (Zaninetta et al., 2017), di qualche cm di lunghezza e del peso di qualche decina di mg.
I risultati ottenuti dalle prove in campo si può concludere che la metodologia sviluppata è riproducibile, consente di valutare i profili verticali di concentrazione dei contaminanti presenti nel soil gas ed è possibile valutare le quantità di BTEX emesse in atmosfera installando i dispositivi a pochi centimetri di profondità. Attualmente sono in corso sperimentazioni atte a validare il metodo come linea guida Unichim e protocollo operativo condiviso con la pubblica amministrazione.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

In generale le misure di aeriformi sono utilizzate nell'ambito dei procedimenti di bonifica dei siti contaminati sia in fase di indagine preliminare/caratterizzazione ambientale, sia per l'esecuzione dell'AdR, sia per la progettazione degli interventi che della loro verifica.
Le tecniche di campionamento degli aeriformi utilizzate nei siti contaminati sono differenti sia per tipologia sia per risultati ottenuti. Esistono principalmente due tipologie di campionamento: attivo e passivo.
Il campionamento attivo si realizza captando i soil gas dal terreno per mezzo di un sistema aspirante. Il prelievo può essere effettuato in modalità diretta, raccogliendo un campione di aria in idonei contenitori (ad esempio i canister, le vacuum bottle, ...), oppure in modalità indiretta per ad-/

as-sorbimento dell'inquinante su un opportuno substrato (ad esempio fiale a desorbimento con solvente, fiale a desorbimento termico) abbinato ad un sistema di aspirazione che deve essere adeguatamente regolato e controllato; per questi supporti l'inquinante ad-/as-sorbito viene recuperato, una volta in Laboratorio, per desorbimento (termico o con solvente, a seconda dei casi) e avviato all'analisi quali-quantitativa strumentale.

I sistemi di campionamento attivi permettono di stimare quantitativamente il contenuto delle sostanze ricercate nei gas interstiziali, possono essere abbinati a sonde di diversa profondità al fine di ricavare il profilo verticale della contaminazione, e permettono di prelevare ed analizzare molti campioni in un giorno. Tuttavia, come svantaggio, necessitano dell'installazione di sistemi di estrazione dei gas interstiziali e non sono utilizzabili in terreni con bassa permeabilità (indicativamente con valori inferiori a 10-6 m/sec) o con elevato tenore di umidità il cui valore è funzione della granulometria del terreno a causa della carenza di vuoti interconnessi nella matrice solida.

Il monitoraggio con camere di flusso è potenzialmente applicabile nelle stesse fasi procedurali nelle quali sono svolti i monitoraggi con sonde di soil gas, ovvero di supporto ad altre tecniche di indagine, in fase di investigazione iniziale (in via minoritaria), in fase di caratterizzazione finalizzata all'implementazione o revisione dell'Analisi di Rischio ed in fase di bonifica per verificare, in corso d'opera, l'efficacia degli interventi.

Tale strumentazione permette di valutare il contributo degli inquinanti presenti in suolo superficiale, non rilevabile con le sonde di soil gas. L'uso della camera di flusso è peraltro annoverato tra le linee di evidenza con cui il Ministero dell'Ambiente, nelle proprie linee guida (MATTM, 2014-2015), indica le modalità con cui è possibile valutare il percorso di volatilizzazione dei vapori.

Con il campionamento passivo gli analiti di interesse vengono raccolti mediante trappole di materiale ad-/as-sorbente che possono essere alloggiate in prefori praticati nel terreno a profondità dell'ordine di 1 m o, per profondità superiori, all'interno di sonde costituite del tutto o in parte di materiali permeabili ai vapori. I campionatori sono in genere costituiti da vial in vetro contenente un materiale adsorbente (resine polimeriche o carbonatiche) sigillato all'interno di una membrana in politetrafluoroetilene (PTFE) porosa, che consente ai vapori contaminanti di migrare dagli interstizi del terreno al materiale adsorbente, bloccando al contempo le particelle di terreno e l'acqua eventualmente presente. Le trappole sono raccolte dopo un periodo di tempo sufficientemente lungo e l'inquinante ad-/as-sorbito viene recuperato per desorbimento ed analizzato in laboratorio.

I sistemi passivi sono caratterizzati da semplicità e rapidità di installazione, non richiedono una particolare manutenzione, comportano un minimo disturbo alle caratteristiche del sottosuolo e possono essere utilizzati anche in terreni poco permeabili e/o con tenori elevati di umidità; tuttavia presentano elevati rischi di subire fenomeni di saturazione (breakthrough), retrodiffusione o "svuotamento" dei pori (effetto starvation, ovvero un iniziale eccessivo adsorbimento in corrispondenza della zona campionata, che porta ad alterare l'equilibrio di fase e ad una sottostima delle concentrazioni attese nel soil gas). Ad oggi, i sistemi commercializzati, danno spesso solo informazioni di tipo qualitativo o al più semiquantitativo; i risultati sono infatti in genere espressi come quantità di contaminante rilevato da ogni campionatore e non come concentrazione di contaminante, essendo difficilmente quantificabile la portata effettiva di gas presente in un mezzo

poroso che entra in contatto con il materiale adsorbente. Al fine di superare alcune delle criticità esposte in precedenza, negli ultimi anni a livello nazionale ed internazionale, sono state proposte tecniche di campionamento passivo basato su sistemi che operano in condizioni di equilibrio. A tal fine possono essere utilizzati una vasta gamma di adsorbenti polimerici come ad es. polietilene a bassa densità, polidimetilsilossano, poliossimetilene o fibre in SPME (Solid-phase microextraction).

L'applicazione di adsorbenti polimerici per il monitoraggio passivo delle concentrazioni dei contaminanti organici in fase disciolta nelle acque sotterranee e nei sedimenti risulta ormai ben consolidata (Vrana et al., 2005; U.S.EPA 2012). Recentemente, Eni sta portando avanti un progetto internazionale con il Massachusetts Institute of Technology (MIT) di Boston e con l'Università degli Studi di Roma "Tor Vergata" per l'applicazione di tale tipologia di campionatori al monitoraggio passivo del soil gas.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 7

CARATTERIZZAZIONE DI SITI CONTAMINATI MEDIANTE APPROCCIO INNOVATIVO: PROTOCOLLO INTEGRATO DI TECNICHE DI FINGERPRINTING ISOTOPICO E DI TECNICHE MOLECOLARI (ENI/ SYNDIAL)

I solventi clorurati e gli idrocarburi in generale rappresentano una porzione prioritaria all'interno dei contaminanti presenti nei siti contaminati sul territorio italiano, con influenze sugli ecosistemi e la salute umana per la presenza di composti relativamente persistenti spesso cancerogeni e/o mutageni. Una volta nell'ambiente, questi contaminanti possono essere sottoposti a processi chimico-fisici (es. evaporazione, solubilizzazione e assorbimento), chimici (es. riduzione abiotica) e biologici (i.e. biodegradazione ad opera di microrganismi) in grado di variarne le concentrazioni così come alterarne la composizione chimica. Questi processi, in particolar modo quelli biodegradativi, possono portare alla totale conversione dei contaminanti organici in specie inorganiche (come metano, anidride carbonica, acqua e sali). Tutti questi processi assieme, sono noti col nome di Attenuazione Naturale (NA), che se propriamente monitorati costituiscono l'attenuazione naturale monitorizzata (MNA), una fra le tecnologie più convenienti e ecosostenibili applicabili per la bonifica di un sito contaminato. Tuttavia, il contributo della NA al raggiungimento degli obiettivi di bonifica dipende dalle condizioni sito-specifiche perché un buon esito è vincolato alla coesistenza di determinate condizioni, quali la presenza di microrganismi competenti ed adatte condizioni nutrizionali (es. N, P, O_2 ...) e di crescita (es. T, potenziale redox, salinità, pH...). In base a queste considerazioni è evidente la necessità di determinare di volta in volta l'efficienza sito-specifica della NA.

I processi ambientali cui sono sottoposti i contaminanti, rende spesso difficoltosa la caratterizzazione dei siti contaminati, difficoltà che si traduce in incertezze nel modello concettuale e nell'identificazione del vero responsabile della contaminazione stessa. Per ridurre tali incertezze, durante il processo di caratterizzazione, è possibile accoppiare l'analisi chimica di routine con le analisi di Coumpound Specific Isotope Analysis (CSIA), basata sull'utilizzo di gas cromatografia-spettrometria di massa isotopica (GC-IRMS), che permette l'identificazione della fonte di contaminazione tra le diverse fonti plausibili e la determinazione degli effetti degradativi avvenuti sulla stessa. I dati di output di queste analisi sono rappresentati del valore del rapporto isotopico tra gli isotopi stabili degli atomi che costituiscono in maggioranza questi contaminanti, ovvero carbonio (rapporto $^{13}C/^{12}C$), cloro (rapporto $^{37}Cl/^{35}Cl$) e idrogeno (rapporto $^{2}H/^{1}H$). Tale rapporto è caratteristico e legato a vari fattori, come ad esempio l'origine di fabbricazione (in base alle materie prime e ai processi produttivi), e viene modificato nel tempo a seguito dei processi di degradazione cui il contaminante è soggetto. Tuttavia, l'applicazione del fingerprinting isotopico non risulta essere sempre risolutiva, ma i dati ottenuti possono essere ulteriormente consolidati attraverso l'inte-

grazione con analisi microbiologiche di comunità e molecolari. Lo studio della comunità microbiologica presente in un sito permette un confronto tra le varie specie presenti nei campioni. La presenza di diversi ceppi batterici dipende dalle condizioni ambientali e, di conseguenza, i cambiamenti nella comunità microbiologica sono legati alla presenza di un'eventuale contaminazione e ai suoi cambiamenti nel tempo. La NA si basa infatti sull'assunto che diversi ceppi batterici sono in grado di usare i contaminanti presenti nei siti come fonte di carbonio o di energia durante i loro processi metabolici. A seconda delle condizioni ambientali, le vie metaboliche seguite dai batteri durante la degradazione dei composti chimici sono diverse e sono determinate dalla capacità del ceppo batterico stesso di degradare un contaminante, capacità strettamente legata alla presenza di specifici geni catabolici all'interno del DNA batterico. La presenza e la variazione di abbondanza di questi geni può essere correlata alla degradazione dei contaminanti. La sinergia tra i due metodi permette quindi una caratterizzazione della contaminazione più accurata, identificandone al contempo la sorgente e permettendo di valutarne il grado ed i processi di alterazione subiti nell'ambiente (velocità di degradazione e scelta della tecnologia di bonifica più efficace).

MOTIVAZIONI STRATEGICHE PER LO SVILUPPO

I protocolli di analisi CSIA integrate ai metodi microbiologici molecolari si stanno dimostrando uno strumento potente per determinare origine ed eventuali processi degradativi dei contaminanti immesse nell'ambiente. Vista la complessità della gran parte dei siti contaminati destinati ad attività di bonifica, dove possono coesistere meccanismi concomitanti di trasformazione e ripartizione dei contaminanti in condizioni 'naturali', è sicuramente opportuno affiancare le misure CSIA del sito con sperimentazione di laboratorio su matrici native ed utilizzare tecniche a supporto, che inquadrino i dati di frazionamento della molecola nell'ambiente ben caratterizzato a livello di diversità delle comunità microbiche. Nell'iter di bonifica di un sito che prevede caratterizzazione, progettazione e realizzazione del Progetto Operativo di Bonifica (POB), un consolidamento della conoscenza in fase di caratterizzazione determina un risparmio di tempo e costi a livello dell'intero processo, poiché permette di diminuire il rischio di scelta di tecnologie non efficaci.

In questo contesto, la determinazione di protocolli sito-specifici (diversi contaminanti da analizzare isotopicamente a cui sono associate comunità batteriche selezionate dallo specifico contesto e quindi differenti geni catabolici da monitorare) porterebbe ad un risparmio economico consistente in un panorama in cui la relazione del JRC (Joint Research Center di Ispra_VA) del 2018 inserisce l'Italia nel gruppo di paesi europei in cui si contano tra i 1000 e i 10000 siti con suoli classificati con "status 2" (i.e. Sites in need of investigation/still to be investigated or under investigation where there is a clear suspicion of contamination). Sempre il JRC, nel 2017 riportava che, nei 41 SIN (Siti d'Interesse Nazionale), i Piani di Caratterizzazione sono stati conclusi al 64% per quanto riguarda la matrice suoli e per il 61% per quanto riguarda le acque di falda, quindi vi è ancora un ampio margine in cui poter proporre e applicare questo protocollo innovativo.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

In passato, l'approccio isotopico veniva applicato esclusivamente per ottenere informazioni geochimiche e a scopo forense per l'identificazione e la caratterizzazione di idrocarburi, mentre la

sua applicazione in campo ambientale è piuttosto recente, con i primi articoli riguardanti l'applicazione di tecniche di CSIA in campo ambientale, in particolar modo per lo studio di acque sotterranee contaminate da idrocarburi e da solventi clorurati, risalenti al 1999 (Canada/USA). Negli Usa, in particolar modo, l'applicazione della CSIA accoppiata alle analisi microbiologiche/molecolari è molto usata in dibattiti legali per identificare il numero di fonti di contaminazione e per poterle differenziare le une delle altre, per valutare i meccanismi ed il grado di degradazione del contaminante e quindi, in ultima battuta, identificare il responsabile della contaminazione. Per garantire un uso appropriato della CSIA in questioni legali ed il rispetto la Regola federale n° 702 (Federal Rule of Evidence n°702) e degli Daubert standards, i giudici e gli avvocati devono essere messi in condizioni di comprendere le capacità e i limiti di questo strumento. I dati scientifici prodotti devono essere difendibili e l'esperto chiamato come testimone qualificato da un titolo di studio ed un'esperienza adeguata di modo da garantire l'ammissibilità e la validità di queste prove analitiche.

Dato lo stato avanzato dello stato dell'arte in USA e Canada, anche a livello legale, in queste nazioni sono presenti numerosi laboratori, sia privati che universitari, che si occupano di analisi CSIA ambientali. Il numero di tali laboratori è molto inferiore nelle nazioni europee e, nello specifico, in Italia la metodologia in questione è ancora talmente poco conosciuta che stanno nascendo laboratori specialisti solo a partire dagli ultimi 5 anni, con definizione dei primi protocolli incentrati sull'analisi del rapporto isotopico del carbonio (rapporto 13C/12C). Di contro, laboratori specializzati in analisi molecolari e studi microbiologici sono notevolmente molto più diffusi anche se non tutti sono equipaggiati con strumenti di avanguardia e tecnici formati per le analisi di comunità batteriche attraverso sequenziamenti di DNA di ultima generazione.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE PER LO SVILUPPO

Lo sviluppo richiede un approccio multidisciplinare, competenze specialistiche ed importanti investimenti per la definizione di protocolli specifici per ogni inquinante e per l'implementazione delle analisi CSIA su cloro e idrogeno. Per sviluppare ulteriormente la metodologia su scala nazionale e portarla all'attenzione degli addetti ai lavori (per la caratterizzazione dei numerosi siti contaminati esistenti sul territorio) è indispensabile definire una struttura che possa coinvolgere ed integrare le aziende interessate, le società di consulenza ambientale e gli Enti di Ricerca (universitari e non).

Per lo sviluppo di un protocollo integrato di caratterizzazione iniziale di un sito contaminato da molecole per cui non sono ancora stati sviluppati i metodi analitici occorre un investimento a partire da circa 40.000 euro. Tale costo comprende lo sviluppo di suddetti metodi, la stima di fattori di arricchimento isotopico per un paio di condizioni studiate a scala di laboratorio (es. aerobica e anaerobica), relative analisi isotopiche e molecolari su 10-20 campioni a scala di sito e redazione di un protocollo analitico ed interpretativo finale. Tali costi possono scendere notevolmente (circa 50%) per molecole di cui già esistono metodi di analisi e/o nel caso fossero disponibili dati di letteratura da utilizzare (es. per biomarkers specifici e/o fattori di arricchimento).

POTENZIALE RICADUTA OCCUPAZIONALE

Come affermato in precedenza, sul territorio nazionale sono pochissimi i laboratori specializzati in analisi CSIA ambientali e quelli che forniscono servizi di sequenziamento di DNA di ultima generazione. Di conseguenza, integrando questo approccio nella caratterizzazione dei siti contaminati crescerebbe la domanda di specialisti del settore, in grado di produrre dati ammissibili e difendibili anche in sede di eventuali contenziosi. Si potrebbe prevedere la nascita di diversi laboratori specializzati (da 1 a 5) così come la creazione di figure specializzate in simili approcci integrati per la caratterizzazione e bonifica di siti contaminati (da 10 a 50).

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 8

ROBOTICA PER IL MONITORAGGIO DI AMBIENTI ACQUATICI

Una buona gestione degli ambienti acquatici, siano essi acque interne, costiere o di mare profondo, richiede lo sviluppo di tecnologie e sensori innovativi in grado di monitorare l'impatto ambientale presente e futuro delle attività economiche ed industriali e valutare lo stato di salute degli habitat. Gli ambienti acquatici sono connessi a settori economici strategici a livello nazionale ed europeo, si pensi ad esempio alle reti di distribuzione dell'acqua in agricoltura, ai bacini idrici per la produzione di energia idroelettrica, alle aree costiere e di mare aperto con le attività di pesca, acquacoltura e trasporti marittimi e di mare profondo con le attività estrattive.

Sul territorio nazionale sono presenti più di 1500 laghi, 1200 corsi d'acqua e 7400 km di coste. In una nazione così interconnessa con gli ambianti acquatici, la nascita di un'economia blu è strategica e deve diventare uno degli obiettivi tecnologici nazionali del prossimo futuro. Ne è prova l'azione della Commissione Europea (seguita da azioni di carattere nazionale) che, con l'iniziativa della **Crescita Blu (Blue Growth),** vuole valorizzare il potenziale dei mari, degli oceani e delle coste europee per la creazione di nuove opportunità lavorative e di nuove aziende nei settori produttivi della cosiddetta **"Economia Blu".**

Ad oggi, il mercato di riferimento per il monitoraggio ambientale con Unmanned Vehicles (UV) è principalmente legato ai droni aerei, settore industriale ben consolidato anche sul territorio nazionale. Le prospettive di sviluppo tecnologico future per il settore UV vedono i droni acquatici come un nuovo settore tecnologico ad oggi non ancora pienamente espresso, in particolare per le piattaforme AUV (Autonomous Underwater Vehicle) sistemi sommergibili a pilotaggio filoguidato/autonomo e USV (Unmanned surface vehicle) sistemi superficiali o semi-sommergibili a pilotaggio autonomo e radioguidato. Numerose sono le problematiche ambientali legate alla qualità delle acque, allo stato dei fondali e alla vulnerabilità degli ecosistemi acquatici che potrebbero trovare soluzioni innovative nell'utilizzo di sistemi autonomi sia di superficie, sia subacquei che andrebbero ad affiancarsi/integrare i metodi di indagine/monitoraggio tradizionali. Di seguito alcune problematiche particolarmente rilevanti nel contesto nazionale che troverebbero beneficio nello sviluppo di tali tecnologie:

- sicurezza di infrastrutture sommerse o semi sommerse (es: monitoraggio delle pile in alveo di strutture viarie, argini fluviali, dighe, condotte sottomarine ed impianti industriali near e off-shore);
- difesa della fascia costiera (es: erosione costiera e salvaguardia ambientale nell'ottica di uno sfruttamento ecosostenibile della costa);
- qualità delle acque (es: di balneazione o di approvvigionamento idrico per la potabilizzazione e a scopo irriguo);
- monitoraggio di aree di difficile accesso, pericolose o interdette alla navigazione (es: siti in-

quinati, bacini idrici non navigabili, aree marine protette);
- interramento di bacini artificiali (es: navigabilità delle aree portuali, variazioni dei volumi di invaso nei canali di irrigazione e nei bacini di approvvigionamento idrico).

MOTIVAZIONI STRATEGICHE PER LO SVILUPPO

Per incentivare e migliorare le attività di monitoraggio ambientale e creare nuovi sistemi/servizi con piattaforme autonome è possibile seguire tre approcci:
Sviluppo di nuove piattaforme acquatiche (AUV e USV) adeguate ai servizi sopra descritti che presentino caratteristiche di facile utilizzo, costo contenuto, portabilità, integrabilità con strumenti commerciali, bassi consumi/elevate prestazioni;
Sviluppo di nuovi sensori/strumenti progettati per essere integrati con e su piattaforme autonome, tra cui : i) strumentazione ottica (per droni aerei, AUV e USV), questa attività dovrà riguardare anche l'individuazione di indici spettrali per ricavare parametri ambientali; ii) strumentazione acustica – (es. sub-bottom profiler – ecoscandagli e sonar a scansione laterale) per indagini indirette del fondo, del sottofondo e dell'habitat; iii) sensoristica elettrochimica e gascromatografica per la raccolta in-situ di dati ambientali in acque superficiali e profonde; iv) campionatori d'acqua superficiali e profondi;
Sviluppo di nuovi sistemi di comunicazione subacquea dai costi contenuti per permettere ai sistemi subacquei di navigare in autonomia. Questa attività dovrà riguardare la progettazione di nuovi sistemi di invio e ricezione dati telemetrici in ambiante subacqueo.

Un approccio che integri queste tre tematiche potrà aumentare esponenzialmente lo sviluppo di tecnologie per il monitoraggio dei diversi ambienti acquatici.
Progettualità che affrontino i tre temi proposti dovranno tenere conto della presenza sul mercato di sistemi commerciali già consolidati (es: ROV, AUV, sonde multiparametriche di profondità, sistemi di comunicazione acustica), caratterizzati da costi elevati che fino ad oggi ne hanno ristretto il campo di utilizzo a settori altamente remunerativi (es Oil&Gas) o ad indagini a scopo di ricerca, limitandone il largo impiego mirato ad un più efficace monitoraggio dello stato di salute degli ambienti. Pertanto le innovazioni proposte dovranno essere centrate sull'avanzamento tecnologico, ma anche sulla riduzione dei costi di produzione dei sistemi, mantenendone elevate le prestazioni.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Sul territorio nazionale sono presenti laboratori di eccellenza che sviluppano tecnologie acquatiche destinate ad attività di ricerca o a monitoraggi dedicati al mondo industriale. I gradi di avanzamento tecnologico di queste innovative piattaforme e sensori non sono sempre omogenei poiché essenzialmente legati a progettualità nazionali ed europee che ne hanno finanziato solo parzialmente lo sviluppo.
Sono attive sul territorio nazionale numerose aziende che offrono servizi di monitoraggio acquatico rivolti ad enti o imprese nazionali ed internazionali, per la gestione di: acque interne e costiere, impianti off-shore, porti, bacini artificiali e reti di distribuzione acque, etc. La strumentazione utilizzata per queste attività di monitoraggio è principalmente commercializzata da produttori nord

americani e nord europei. Sul territorio nazionale, poche sono le aziende attive nello sviluppo di sensoristica o sistemi per il monitoraggio acquatico; sono infatti per lo più presenti rivenditori di tecnologie estere.
La richiesta di nuove tecnologie in un mercato come quello del monitoraggio ambientale acquatico è confermata dalla crescente attenzione verso i problemi ambientali delle acque, degli ambienti sommersi e delle infrastrutture ad essi connesse.
Questo stato dell'arte rappresenta un vantaggio se viene incentivata la possibilità di fare rete tra domanda ed offerta in questo settore tecnologico. Sul territorio nazionale sono presenti sia le competenze ed il know-how per lo sviluppo di tecnologie acquatiche, sia la domanda di servizi ad opera di mezzi autonomi, sia aziende pronte a commercializzare nuovi servizi/prodotti per il monitoraggio acquatico.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE PER LO SVILUPPO

L'implementazione di tecnologie per il monitoraggio ambientale acquatico, nell'ottica delle tre direttrici di sviluppo individuate, richiede un approccio multidisciplinare con l'identificazione di competenze specifiche ed importanti investimenti. Per poter sviluppare efficacemente le tecnologie proposte è indispensabile definire una struttura che possa coinvolgere ed integrare in un'unica filiera Enti di Ricerca, laboratori industriali, aziende di servizi e industrie interessate.
Le attività devono essere orientate verso lo sviluppo di piattaforme modulari, software di navigazione, sensoristica dedicata, scafi ed alloggi strumentali adatti ad operare sia in ambienti sommersi superficiali che ad alte profondità, inoltre è necessario prevedere test di operatività dei sistemi sia in ambienti controllati che in acque libere.
Una stima di budget per i tre approcci delineati è dell'ordine dei 10 milioni di Euro.

POTENZIALE RICADUTA OCCUPAZIONALE

L'implementazione delle tecnologie in questo campo permetterà di sviluppare nuovi servizi di monitoraggio ambientale basati su sistemi autonomi, pensati per un pubblico allargato di utilizzatori e per risolvere molteplici problematiche. Le potenziali ricadute occupazionali delle attività proposte si articolano su tre livelli:
- Ricaduta diretta sulle attività di monitoraggio ambientale. Lo sviluppo di piattaforme autonome per monitoraggi ambientali e di nuova sensoristica dai costi di acquisto e di esercizio contenuti aumenterebbe notevolmente la richiesta di servizi, favorendo la creazione di nuove aziende e di nuovi posti di lavoro. Ciò potrà prevedere anche la creazione di nuove figure professionali dedicate al pilotaggio e alla gestione dei mezzi autonomi.
- Ricaduta diretta nella produzione e la commercializzazione dei sistemi e della sensoristica. L'inserimento sul mercato dei nuovi sistemi porterà allo sviluppo di una filiera di produzione che richiederà sia competenze informatiche, elettroniche, nautiche, geofisiche e chimiche per la progettazione delle piattaforme e della sensoristica, sia di manodopera specializzata nell'assemblaggio dei sistemi, sia personale esperto nella commercializzazione.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 9

BIORAFFINERIE DI NUOVA GENERAZIONE

L'Italia è fra i Paesi all'avanguardia nel concreto sviluppo della bioeconomia, quella che produce i molteplici beni e materiali necessari ai vari comparti dell'economia non più dal petrolio, ma dalle risorse biologiche; e in particolare dalla biomassa non destinata all'alimentazione come gli scarti lignocellulosici, quelli agricoli, e quelli dell'industria alimentare.

Quasi 40 anni fa, ai tempi della Montedison-Ferruzzi, l'Italia era già fra i pionieri delle prime fasi della bioeconomia. Non è certo un caso che sia sorto in Italia il primo impianto industriale di successo per la produzione di bioplastica ricavata dall'amido dal mais poi utilizzata per la produzione di sacchetti biodegradabili al posto di quelli in polietilene.

Da allora, i chimici di tutto il mondo hanno sviluppato processi interamente puliti (altamente selettivi) e a basso *input* energetico capaci di convertire in sostanze ad alto valore aggiunto non più i prodotti agricoli come l'amido, gli oli di semi e la canna da zucchero, ma la cellulosa e la lignina degli scarti forestali ovvero prodotti agricoli ottenuti in quantità misurate annualmente nel mondo in *centinaia di milioni* di tonnellate.

ALCUNI ESEMPI ITALIANI

A Corte Tegge, poco distante da Reggio Emilia, lo stabilimento di estrazione degli antociani dalle bucce dell'uva da anni dà lavoro a decine di persone.

La semplice tecnologia estrattiva utilizzata consente di ottenere dalle bucce dell'uva rossa, in meno di 6 ore dalla raccolta nelle campagne circostanti, la preziosa enocianina (additivo E163: "estratto di bucce d'uva") che poi colorerà di rosso svariati prodotti alimentari e bevande, al posto dei coloranti sintetici ottenuti dal catrame e da tempo associati alla Sindrome da deficit di attenzione e iperattività dei bambini.

Poco più in là, a Castel San Pietro Terme, è in produzione da alcune settimane il nuovo stabilimento che converte la glicerina naturale ottenuta dalla produzione del biodiesel nella bioplastica PHA: un bio-poliestere con eccellenti proprietà fisiche e chimiche con cui fra l'altro è possibile sostituire le microperle di plastica sintetica contenute in rossetti e in decine di altri cosmetici, ormai fuori legge negli USA, quali agenti dell'inquinamento invisibile dei mari (vengono mangiate dai pesci con gravi danni all'ecosistema).

Più a Sud, alle porte di Caserta, da oltre tre anni opera con successo un'altra nuova azienda che converte in acido levulinico frazioni cellulosiche di varia origine, incluse quelle delle potature dei giardini urbani. L'acido levulinico è un importante *fine chemical* utilizzato fra l'altro nella produzione di plastiche biodegradabili e fertilizzanti.

In Sicilia, a Chiaramonte Gulfi, si effettua l'estrazione dei biofenoli contenuti nelle acque di vegetazione sottoprodotto della molitura delle olive. Inaugurato da una visita del Ministro *pro tempore*

del Lavoro e dal Sottosegretario alla Ricerca alla fine del 2016, l'impianto ha trasformato un frantoio in un impianto di produzione olearia a zero emissioni, mentre l'azienda della bioeconomia ne ottiene gli antiossidanti più potenti ad oggi conosciuti, già utilizzati in prodotti nutraceutici, alimentari e cosmetici.

MOTIVAZIONI STRATEGICHE PER LO SVILUPPO

Mentre la gran parte delle bioproduzioni chimiche nel passato avvenivano a costi più elevati delle concorrenti produzioni petrolchimiche, oggi le bioraffinerie producono molti dei loro bioprodotti ad un costo inferiore rispetto agli omologhi prodotti ottenuti dal petrolio.

Questo sta determinando un *boom* globale delle bioproduzioni, nonostante il prezzo del petrolio si mantenga a livelli bassi da oltre tre anni.

In breve, nel volgere del prossimo decennio l'industria della petroplastica subirà un crollo delle produzioni simile a quello registrato dalle aziende del termoelettrico con il boom mondiale di eolico e fotovoltaico. Il passaggio della produzione della plastica dai monomeri ottenuti dal petrolio, agli zuccheri e ai terpeni ottenuti dalle risorse biologiche con le nuove biotecnologie chimiche, sarà rapidissimo.

Come avviene per l'energia prodotta dalle fonti rinnovabili, la produzione di sostanze e materiali a partire da risorse biologiche disponibili *a costo marginale sostanzialmente nullo* chiude il ciclo produttivo e apre enormi prospettive di crescita economica. Una volta avviati al riciclo, infatti, i bioprodotti diventano materia prima per altri prodotti o i loro componenti rientrano nei rispettivi cicli naturali.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Da oltre un anno, si susseguono in tutto il mondo svariate iniziative per sensibilizzare le popolazioni ai gravi problemi ambientali posti dall'uso della plastica derivata dal petrolio per produrre oggetti usati una volta e subito buttati via, quali: bottiglie, sacchetti, bicchieri, piatti, cassette per il cibo e persino i bastoncini per la pulizia delle orecchie che ogni anno vede i volontari delle associazioni ambientaliste raccoglierne a migliaia nei tratti di costa prossimi alle foci dei fiumi.

Il motivo per cui, nel 2018, l'umanità non si sia ancora liberata delle plastiche non biodegradabili ottenute dal petrolio nella cifra *monstre* di 300 milioni di tonnellate all'anno, è molto semplice: a produrre la plastica è la stessa industria petrolchimica che si occupa della raffinazione del petrolio per produrre combustibili.

Questo fa sì che quando il prezzo del petrolio è basso si assiste ad un boom delle produzioni petrolchimiche *tout-court* che vanno in parte a compensare il calo delle entrate legate alla vendita dei combustibili; mentre, quando il prezzo del petrolio è elevato, la disponibilità pressoché illimitata di petrolio consente di continuare le produzioni petrolchimiche compensando le perdite della petrolchimica con le maggiori entrate legate alla vendita dei combustibili.

Per oltre 40 anni numerose nuove aziende hanno provato a rompere questo *loop* avviando la produzione di bioplastiche, ovvero di plastiche ottenute dalle risorse vegetali. Quelle che sono sopravvissute si contano sulle dita di una mano.

Ma adesso questa situazione cambierà rapidamente. E nel giro di un decennio l'industria della pe-

troplastica subirà un crollo delle produzioni simile a quello registrato dalle aziende del termoelettrico con il boom mondiale di eolico e fotovoltaico.
Per due ragioni. Una economica, e l'altra tecnologica.
Da un lato, le nuove aziende della bioplastica hanno compreso che, invece di produrre plastiche a basso valore aggiunto come quelle usate per produrre i sacchetti, devono produrre plastiche ad alte prestazioni come quelle ritrovate nei cosmetici e nei prodotti del *personal care*. Come fa l'azienda italiana che a Castel San Pietro Terme utilizza i suoi nuovi bioreattori alle porte per produrrà le prime 1000 tonnellate all'anno di *microbeads* in PHA (una bioplastica completamente biodegradabile).
Il valore (e dunque il prezzo) molto più alto di queste produzioni consente da un lato di remunerare molto più rapidamente gli investimenti, e dall'altro riduce di molto il gap di prezzo con la petroplastica concorrente.
L'altra ragione è tecnologica: nel corso degli ultimi dieci anni sono stati sviluppati nuovi processi (catalitici e biocatalitici) in grado di rendere disponibili zuccheri dalla biomassa lignocellulosica e convertirli, con livelli di efficienza finora sconosciuti, sia in nuovi precursori delle nuove bioplastiche come i terpeni sia in bioplastiche ad altissimo valore aggiunto.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE PER LO SVILUPPO

Esiste, chiaramente, una via italiana alla bioeconomia. È possibile finanziarne l'ulteriore sviluppo con risorse pubbliche e private con un budget annuo dell'ordine dei 10 milioni di euro per i prossimi dieci anni, finanziando le attività di ricerca di sviluppo lungo le due semplici direttrici identificate: produzioni ad alto valore aggiunto dalla frazione lignocellulosica e dai terpeni.
Le ricerche porteranno allo sviluppo delle tecniche di produzione più efficaci ed efficienti, e alla consegna alle imprese di studi di fattibilità completi della parte tecnologica ed economica.

POTENZIALE RICADUTA OCCUPAZIONALE

Lo sviluppo di tecnologie competitive per bioproduzioni chimiche ad alto valore aggiunto ha evidenti e concrete ricadute occupazionali, come dimostrano le migliaia di addetti già al lavoro nelle poche, ma altamente profittevoli, aziende italiane della nuova bioeconomia.
L'impatto è diretto attraverso lo sviluppo di nuova occupazione qualificata nelle aziende dell'industria della bioeconomia, simile per composizione a quella dell'industria chimica tradizionale, ma anche indiretto attraverso nuovi sbocchi per i settori agricolo e forestale. Tali aziende, che diventano i fornitori delle risorse biologiche processate all'interno della nuova industria della bioeconomia, saranno d'interesse non più per i loro prodotti, come avveniva con le bioraffinerie di vecchia generazione (biodiesel, bioetanolo etc.), ma per i loro co-prodotti che fino ad oggi venivano destinati ad usi a basso valore aggiunto, o addirittura processati come rifiuti (si pensi alla produzione di biofenoli dalle acque di vegetazione olearie o alla produzione di acido levulinico dagli scarti delle potature).

SETTORE 2

>ENERGIA<

MEMBRI DEL GRUPPO DI LAVORO

Settore – Energia

Coordinatori	
ENI	**Vincenzo Calemma**
ENEA	**Giambattista Guidi**
Componenti	
CNR	**Alessandra Sanson**
EMA	**Michele Di Foggia**
ENEA	**Piero De Fazio**
	Paolo Deiana
	Simona De Iullis
	Marialaura Di Somma
	Giorgio Graditi
	Giuseppe Messina
	Stefano Stendardo
	Mario Tucci
	Maria Valenti
ENEL	**Valerio Cinti**
	Stefano Malloggi
ENI	**Paolo Biagini**
	Daniele Bianchi
	R. Carbone
	Fabio Castaldo
	Andrea Di Chiara
	C. Lazzari
	D. Maddalena
	M. Manni
	Laura Meda
	Thomas Pasini
	C. Pattumelli
	Marco Piantanida
	Riccardo Po'
	Pietro Scorletti
	Francesca Spadavecchia
	Manuela Toscanini
ERNST&YOUNG	**M. Dimauro**
UNIVERSITÀ DI PISA	**Andrea Pucci**
VERSALIS	**Paolo Lomellini**

1. DIGITALIZZAZIONE NELL'INDUSTRIA ENERGETICA

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 1

BIG DATA E ANALYTICS: LE NUOVE OPPORTUNITÀ NEL SETTORE ENERGETICO

Parlare di Big Data come una novità all'interno del settore energetico, e in particolare nella ricerca e produzione di idrocarburi, potrebbe apparire anacronistico. Sin dagli anni '90, l'acquisizione di rilievi sismici 3D ha comportato la gestione e l'elaborazione di moli di dati che spaziano dalle centinaia di Giga alle decine di Terabyte. Queste dimensioni hanno comportato l'introduzione di architetture di super-calcolo (HPC, High Performance Computing) capaci di processare milioni di miliardi di operazioni al secondo, al fine di garantire un alto livello qualitativo dei risultati e di mantenere i tempi di elaborazione dei volumi sismici entro limiti temporali accettabili.

Tuttavia, la novità della Big Data Analytics tocca anche il settore energetico, offrendo importanti opportunità di miglioramento dei progetti di esplorazione e di sviluppo di giacimenti di idrocarburi, e dei processi di gestione e manutenzione degli impianti petroliferi e di produzione di energie rinnovabili, quali impianti solari o eolici. Nei prossimi paragrafi, introdurremo innanzitutto i concetti chiave di Big Data Analytics, e analizzeremo quali di questi concetti possono essere applicati al settore energetico, e con quali modalità.

La necessità di gestire Big Data in termini di Volumi sempre maggiori, Velocità di acquisizione del dato sempre più frequenti, e Varietà di dati sempre più differenziate, ha fatto sì che le architetture di elaborazione tradizionali, basate su database relazionali, application server e web server, siano state negli ultimi anni affiancate o rimpiazzate da tecnologie alternative di tipo open source, supportate da ampie community di sviluppatori che ne stanno garantendo un'evoluzione estremamente dinamica.

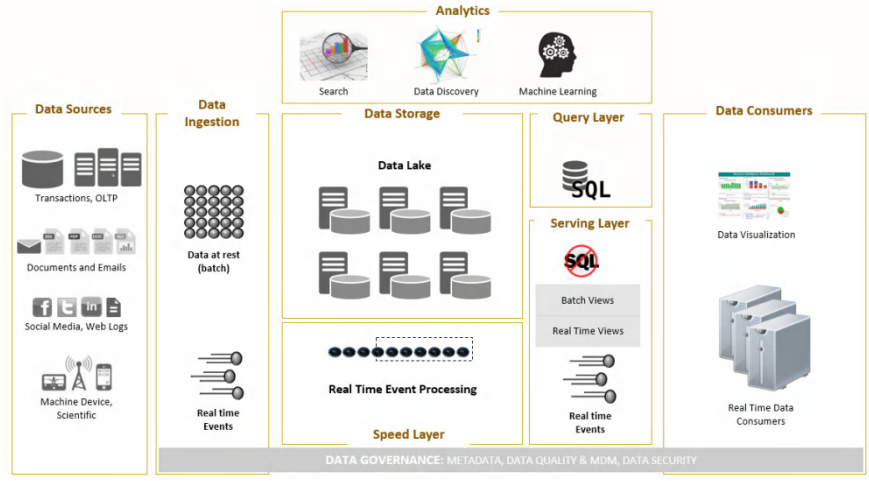
La necessità di gestire ed elaborare Volumi di dati sempre maggiori ha favorito la diffusione del paradigma di file system distribuito di Hadoop. Nel modello promosso da Hadoop, un insieme di computer (nodi), ognuno dotato di capacità di storage locale, è unito in un cluster che rende disponibile all'utente uno spazio di storage (file system) virtuale, denominato HDFS (Hadoop Distributed File System). Nel momento in cui l'utente salva un file di grandi dimensioni su Hadoop, tale file è spezzettato sugli storage locali di ciascun nodo del cluster (con opportuni accorgimenti di ridondanza, in modo da assicurarsi che il file, pienamente integro, sia sempre disponibile anche quando si verifica un guasto allo storage locale di un computer); tuttavia, l'utente ha l'impressione di operare su tale file nella sua interezza: per esempio, può scrivere un algoritmo di analisi dei dati di tale file, e lanciarlo senza preoccuparsi della modalità in cui il file è stato spezzettato sui nodi. L'algoritmo dell'utente viene inviato a ciascun nodo del cluster, e viene applicato alla porzione di file in esso contenuta. Solo i risultati finali dell'elaborazione di ciascuna porzione del file vengono poi trasmessi sul nodo principale del cluster; tali risultati sono di dimensione più contenuta, e possono essere gestiti su un singolo computer. Questo modello operativo, che invia

l'algoritmo ai dati, e non i dati all'algoritmo, è particolarmente efficace nel mondo Big Data, dove la movimentazione dei dati tra computer diversi richiederebbe tempi di trasferimento elevati. La modalità operativa di Hadoop, originariamente basata sul modello denominato Map-Reduce, è progressivamente migliorata negli ultimi anni, con l'introduzione di motori di gestione degli algoritmi sempre più efficienti, e con l'attuale affermarsi della modalità di elaborazione "in-memory" promossa da Apache Spark.

La necessità di gestire moli di dati acquisiti con Velocità sempre più elevate ha fatto emergere due tipologie di tecnologie. Sul lato dei server, sono emerse tecnologie capaci di eseguire elaborazioni su flussi di dati continui (streaming); la tecnologia Apache Spark Streaming, unita con sistemi di acquisizione dati capaci di garantire l'accodamento degli eventi senza perdita di informazioni (es: sistemi publish/subscribe, quali Apache Kafka), sembra attualmente l'architettura di riferimento, all'interno tuttavia di una comunità di sviluppatori estremamente dinamica, che potrebbe portare nuove tecnologie (es: Apache Flink) come ambiente di riferimento per lo streaming computing nei prossimi anni. Al crescere delle capacità di elaborazione lato server, tuttavia, non sempre corrisponde la capacità di trasmettere dati acquisiti ad alta frequenza dai sensori installati sui siti industriali, a causa dei limiti della banda di rete disponibile. La tecnologia dell'Edge Computing permette di installare piccoli server, dotati di capacità di elaborazione autonoma, in prossimità dei sensori che acquisiscono i dati. Gli Edge Computer possono applicare alla fonte algoritmi sofisticati (es: analisi in frequenza, filtri, algoritmi di classificazione e regressione) ai dati ad alta frequenza, permettendo così di trasmettere al server solo dati sintetici di dimensione più limitata, coerentemente con la banda di rete disponibile, che rappresentano tuttavia una fotografia caratteristica del segnale originale; ad esempio ampiezza minima e massima nell'intervallo di tempo, frequenza dominante e armoniche). L'utilizzo di Edge computer può avvenire sia in siti industriali tradizionali, dotati di sistemi di automazione (PLC, Programmable Logic Controller; DCS, Distributed Control System), sia in ambienti dotati di sensori isolati e basati su tecnologia IoT (Internet of Things).

La necessità di gestire moli di dati con Varietà sempre maggiore ha fatto emergere tecnologie di memorizzazione in forma non tabellare, con la diffusione di famiglie di database non relazionali (NoSQL). Il numero di database NoSQL è in continua espansione, e molti di essi supportano la capacità di memorizzare i dati su file system Hadoop, coniugando in tal modo l'espressività della rappresentazione del dato con la capacità di scalare su volumi di dati sempre maggiori. Le tecnologie NoSQL più utilizzate sono al momento le seguenti: le rappresentazioni colonnari dei dati (columnar database), in contrapposizione alla rappresentazione a righe proposte dai database relazionali, permettono di ottimizzare la memorizzazione del dato in base alle famiglie di colonne (i.e. a gruppi omogenei di attributi del dato) di ogni record del database. Ciò permette agli algoritmi che elaborano solo un sottoinsieme degli attributi del dato di accedervi con estrema velocità, senza la necessità di scorrere e caricare gli attributi delle altre colonne di ciascun record. Strumenti quali HBASE e Cassandra sono ampiamente utilizzati all'interno delle soluzioni di Big Data Analytics. Un'altra tecnologia NoSQL particolarmente utilizzata è quella dei database document-oriented, capaci di memorizzare strutture gerarchiche di dati, in contrapposizione alle strutture tabellari dei database relazionali. La rappresentazione gerarchica dell'informazione è comune a molte ti-

pologie di applicazioni; basti pensare che l'organizzazione stessa dei nostri file all'interno delle cartelle del computer è gerarchica, con cartelle e sottocartelle. Questa tipologia di database, il cui rappresentante più conosciuto è MongoDB, è anche estremamente comoda da utilizzare da parte dei programmatori, in quanto il modello dati gerarchico da essi promosso si mappa perfettamente con le strutture XML e JSON sempre più diffuse per lo scambio di dati tramite microservizi. Infine, l'ultima tipologia emergente di database NoSQL è quella a grafo (Graph DB), che permette di rappresentare i dati come "nodi" collegati tra loro da una varietà enorme di "archi", che rappresentano le relazioni che intercorrono tra ogni coppia di nodi. Questa rappresentazione è estremamente utile in tutti i casi in cui gli algoritmi sono focalizzati sulla capacità di far emergere relazioni tra i dati, quali ad esempio le social network analysis (i.e. le relazioni tra utenti, gruppi di utenti, tag, community, all'interno di social network) oppure l'analisi del linguaggio naturale all'interno di documenti non strutturati (es: trovare relazioni tra parole e verbi all'interno di una frase, allo scopo di far emergere un concetto).
L'insieme delle tecnologie sopra descritte ha fatto emergere, negli ultimi anni, il concetto di "Data Lake", qui schematizzato nella seguente figura:



Il Data Lake è un insieme di tecnologie di acquisizione, memorizzazione ed elaborazione di grandi Volumi, capace di supportare e gestire in modo efficiente tutta la Varietà dei dati di interesse con la Velocità di acquisizione desiderata. Lo strato denominato "Data Ingestion" fornisce strumenti per acquisire sia dati statici (provenienti da database tradizionali, file system, siti web) che flussi continui di dati (provenienti da sensori di impianto, oppure da siti web social). Lo strato denominato "Data Storage" contiene tipicamente tecnologie quali Hadoop, con il suo file system distribuito, il motore di elaborazione Spark, e un insieme di database NoSQL, per supportare la memorizzazione di diverse Varietà di dati. Lo "Speed layer" tipicamente contiene tecnologie quali Spark Streaming, per permettere l'applicazione di algoritmi su flussi continui di dati. Le applicazioni che "consumano" questi dati (ad esempio per visualizzarli all'interno di dashboard) possono ti-

picamente usufruire di "viste" sui dati, sia utilizzando il linguaggio di interrogazione standard SQL (che può essere applicato per eseguire query anche su database NoSQL), sia attraverso opportune viste sui dati esposte tramite microservizi. Infine, un ambiente di Data Lab permette usualmente ai Data Scientist di sviluppare algoritmi di data discovery e di machine learning sui dati memorizzati nel Data Lake, e di pubblicare tali algoritmi all'interno di uno stream continuo di dati (nello speed layer) o sui dati statici memorizzati nel Data Storage layer.

Quest'ultimo strumento, il Data Lab, e queste ultime figure professionali emergenti, i Data Scientist, rappresentano il vero vantaggio di business derivante dalla memorizzazione delle grandi moli di dati offerte dal Data Lake. L'esplorazione congiunta di moli e tipologie di dati che, in precedenza, non era possibile analizzare o integrare le une con le altre, ha permesso di identificare correlazioni, pattern, modelli che hanno spesso permesso di rivoluzionare il modo di fare business. L'approccio utilizzato è fortemente data driven, e cioè basato sull'osservazione dei dati e delle loro correlazioni, senza utilizzare (oppure utilizzando in maniera molto limitata) modelli fisico/matematici per spiegare il comportamento delle variabili. Le tecnologie di machine learning, già ampiamente utilizzate su scala più ridotta negli anni '80 e '90, sono state rilanciate dalla possibilità di applicarle su moli di dati significativamente più grandi, e quindi con migliori possibilità di accuratezza nei risultati grazie al fatto di poter essere addestrate su un numero di casi di esempio enormemente maggiore.

Gli algoritmi di machine learning di tipo "supervisionato" sono basati sul seguente approccio: l'algoritmo è sottoposto ad una fase di training, in cui osserva un insieme di esempi che comprendono sia le variabili di input che gli output corrispondenti. In questa fase, l'algoritmo cerca di modificare i suoi parametri interni in modo da predire le variabili di output, nel modo più accurato possibile, a partire da quelle di input corrispondenti. Una volta terminata la fase di training, l'algoritmo viene applicato alle sole variabili di input di un secondo insieme di esempi, utilizzato per la validazione, in modo da calcolare gli output corrispondenti. L'accuratezza dell'algoritmo può essere calcolata confrontando l'output calcolato con quello effettivo dell'insieme di validazione. I più comuni algoritmi di tipo supervisionato sono quelli di classificazione, in cui l'algoritmo deve predire una o più "etichetta" (es: tipo di roccia = argille, tipo di roccia = sabbia), e di regressione, in cui l'algoritmo deve predire uno o più valori numerici (es: stimare un valore di porosità o di permeabilità di una roccia).

Gli algoritmi di machine learning di tipo "non supervisionato" non prevedono invece un insieme di dati di training contenente gli output attesi. I principali algoritmi di questa tipologia sono quelli di "clustering", finalizzati a raggruppare le variabili di input in gruppi omogenei, trattabili poi da algoritmi successivi, e quelli di "riduzione di dimensionalità", orientati a ridurre il numero di variabili di input tramite opportune trasformazioni (es: PCA, Principal Component Analysis) al fine di applicare gli algoritmi successivi su insiemi più maneggiabili di variabili.

L'aumento delle capacità elaborative ha soprattutto dato nuovo sviluppo alle tecniche di machine learning basate su reti neurali. Negli anni '90, le capacità analitiche delle reti neurali erano limitate dal numero di strati interni di neuroni (tipicamente uno o due) e dal numero complessivo di neuroni (tipicamente decine o poche centinaia) utilizzabili nei modelli. Nell'ultimo decennio, l'aumento delle capacità di calcolo e l'utilizzo delle GPU (Graphics Processing Units), capaci di ese-

guire in maniera efficiente calcoli su matrici di grandi dimensioni, ha permesso di superare tali limiti e di utilizzare reti neurali "deep learning" con decine di strati interni di neuroni, con centinaia, o anche migliaia, di neuroni ciascuno. I modelli di deep learning sono stati applicati con grandi risultati al riconoscimento delle immagini (CNN, convolutional neural network), alla generazione di immagini realistiche (GAN, Generative Adversarial Networks), all'analisi del linguaggio naturale (RNN, recurrent neural networks, e LSTM, Long-Short Term Memory neural networks).
L'utilizzo degli algoritmi sopra descritti è stato reso sempre più efficiente, negli ultimi anni, dalla crescente disponibilità di librerie open source scritte nei linguaggi R e Python. Ciò ha permesso a una vasta platea di sviluppatori e Data Scientist di applicare tali algoritmi ai propri dati con la semplice azione di scaricare e installare le librerie corrispondenti. Inoltre, gli ambienti di programmazione Python e R offrono l'opportunità di utilizzare le librerie di machine learning in maniera scalabile, da un'installazione locale sul proprio desktop per le analisi di insiemi di dati di piccole dimensione, all'utilizzo all'interno di un Data Lab collegato a un Data Lake per moli di dati più consistenti, fino all'utilizzo in ambiente pienamente distribuito, utilizzando ad esempio le versioni Spark di tali librerie (Spark MLLib) per avere scalabilità completa al crescere delle dimensioni dei dati.
L'utilizzo degli algoritmi di machine learning in ambiente Data Lake è favorito dalla crescente flessibilità nella predisposizione di ambienti Data Lake basati su cloud. In contrapposizione a soluzioni on premise, dove tutte le componenti del Data Lake sono installati sui server all'interno della rete aziendale, è possibile eseguire in pochi minuti il provisioning (la creazione iniziale) di un ambiente Data Lake con estrema semplicità, specificando il numero di nodi del cluster e i componenti da rendere disponibili (es: Spark). L'estrema flessibilità delle soluzioni basate su cloud rappresenta un vantaggio rispetto alle soluzioni on premise; tuttavia, queste ultime possono presentare vantaggi in termini di migliore integrabilità con tutti i database e le sorgenti dati aziendali, e di minore movimentazione di grandi moli di dati dall'azienda al cloud e viceversa, al fine di alimentare il Data Lake e di restituirne i risultati.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Avendo ora introdotto i principali concetti legati al mondo del Big data Analytics, analizziamo ora alcune prospettive di applicazione al settore energetico, con particolare focalizzazione al mondo dell'esplorazione e produzione petrolifera, caratterizzato da moli di dati significativamente grandi.
In termini di Volumi di dati, le principali sfide computazionali nel mondo petrolifero sono legate all'elaborazione e interpretazione del dato sismico e alle simulazioni di giacimento. Nel primo caso, il dato sismico acquisito in campo deve attraversare una serie di elaborazioni per essere trasformato, attraverso un processo di "seismic imaging", in una serie di immagini 3D interpretabili dagli specialisti di geologia e geofisica. Tali elaborazioni sfruttano modelli fisici legati alla velocità di propagazione delle onde acustiche attraverso formazioni rocciose con caratteristiche diverse, in modo da evidenziare, al termine del processo di imaging, tutte quelle discontinuità (cambi formazionali, faglie) che possono rappresentare oggetti geologici di interesse per la ricerca petrolifera (trappole, giacimenti). Il processo di seismic imaging si può schematizzare, in maniera semplificata, come un problema di inversione, in cui si cerca di stimare i parametri di un modello

fisico del sottosuolo tali per cui, applicando le leggi di propagazione delle onde elastiche mediante simulazione numerica, da questo modello si ottenga una risposta più simile possibile a quella registrata dai geofoni durante le operazioni di acquisizione. Questa elaborazione dei dati basata sulle leggi fisiche potrebbe essere affiancata da tecniche di machine learning per migliorare diversi aspetti del processo: l'applicazione di modelli deep learning di tipo generativo (es: GAN) potrebbe permettere di migliorare la qualità delle immagini sismiche generate, in particolare nei casi in cui si verifichino acquisizioni acustiche incomplete o parzialmente rumorose. Inoltre, l'applicazione di reti convolutive potrebbe aiutare nell'interpretazione automatica delle discontinuità formazionali o delle faglie, che attualmente viene svolta in larga parte con l'intervento manuale degli specialistici di geofisica e geologia. Per ottenere quest'ultimo obiettivo, tuttavia, dovrebbero essere resi disponibili adeguati insiemi di training costituiti da immagini sismiche "etichettate", e cioè abbinate all'output interpretativo desiderato, oppure dovrebbero diffondersi tecniche non supervisionate di riconoscimento delle immagini che possano prescindere dalla non disponibilità dei training set.

Nel caso delle simulazioni di giacimento, la sfida computazionale è rappresentata dall'applicazione delle leggi del moto dei fluidi all'interno di mezzi porosi per simulare lo spostamento delle particelle di acqua, olio e gas all'interno delle formazioni rocciose verso i pozzi produttori su tutto il periodo di operatività del giacimento (tipicamente 15-20 anni). Il giacimento è modellato da una griglia 3D costituita da centinaia di migliaia di celle, ognuna caratterizzata dalle proprietà petrofisiche della roccia, misurate in prossimità dei pozzi, e stimate, introducendo gradi di incertezza, nelle zone tra un pozzo e l'altro. Il corretto trattamento dell'incertezza richiede spesso di eseguire decine di migliaia di simulazioni con scenari diversi, con conseguente impatto sui tempi di elaborazione. Inoltre, migliaia di scenari aggiuntivi possono essere generati nel valutare diverse opzioni di sviluppo del giacimento, con collocazioni diverse dei pozzi iniettori, o con politiche di iniezione differenziate nel tempo al fine di mantenere il giacimento ai livelli produttivi necessari. Anche in questo caso, alle elaborazioni basate sulle leggi fisiche potrebbero essere affiancati metodi di machine learning, in particolare metodi di regressione, al fine di ridurre il numero di simulazioni fisiche necessarie per modellare correttamente le incertezze nei parametri petrofisici e le diverse opzioni di sfruttamento del giacimento.

In altri ambiti, le quantità dei dati da analizzare sono più contenute: ad esempio, i dati raccolti durante la perforazione dei pozzi, costituiti da misure continue (log di pozzo) di alcune proprietà delle formazioni attraversate (resistività, densità, impedenza acustica, ecc.) e da misure di laboratorio su campioni di roccia carotate dal pozzo, sono gestibili e interpretabili senza utilizzare tecnologie di supercalcolo. In questo ambito, inoltre, l'applicazione di tecniche di machine learning di clustering, classificazione e regressione sono utilizzate da anni all'interno dei processi interpretativi. Tuttavia, esse sono applicate nell'ambito di specifici progetti, e cioè utilizzando i dati disponibili nei pozzi di uno specifico giacimento al fine di derivarne una corretta interpretazione petrofisica. L'allargamento dell'ambito di applicazione delle tecniche di machine learning dalla scala di progetto a una scala più globale (es: a scala bacino, oppure considerando tutti i giacimenti di tipo carbonatico a livello mondiale) rappresenta invece una sfida computazionale complessa, e potrebbe offrire nuove prospettive di interpretazione: infatti potrebbe permettere l'individuazione

di pattern di dati correlabili con caratteristiche geologiche e petrofisiche, e quindi un miglioramento della qualità del modello di giacimento. Tale allargamento di ambito non dipende però solo dalla disponibilità di potenza di calcolo: è necessario uno sforzo di standardizzazione dei dati e una notevole disciplina interna di data management per assicurare la consistenza dei risultati delle analisi data driven applicate in contesti geografici o geologici diversi.

In termini di Velocità dei dati, la principale opportunità di applicazione dei Big Data è legata all'interpretazione dei dati real time proveniente dai pozzi (dove sono sempre più spesso installati non solo sensori che forniscono misure puntuali, ad esempio a fondo pozzo e a testa pozzo, ma anche misure continue, lungo tutto il profilo del pozzo, come i DTS – Distributed Temperature Sensors- e i DAS –Distributed Acoustic Sensors-), dagli impianti petroliferi, e dagli impianti per lo sfruttamento delle energie rinnovabili (solare ed eolico). Il comportamento di tali impianti è spesso modellato utilizzando simulatori statici e dinamici che utilizzano leggi fisiche (meccaniche, termodinamiche, idrauliche). L'analisi data driven è già abbondantemente utilizzata per individuare situazioni di funzionamento non ottimale, o per predire possibili guasti alle apparecchiature, individuando pattern di malfunzionamento tra misure che non sono correlabili tra loro tramite leggi fisiche. L'utilizzo dell'Edge Computing si sta diffondendo per interpretare alla fonte le misure campionate ad alta frequenza, per esempio le vibrazioni di cuscinetti ed alberi sulle macchine rotanti, quali compressori e turbine.

Infine, in termini di Varietà, molti dei dati e dei modelli da interpretare sono estremamente complessi, e non sono facilmente rappresentabili in modalità tabellare all'interno di database relazionali. Molti dei formati dati dell'industria energetica sono basati su XML (es: WITSML per i dati di pozzo, PRODML per i dati legati alla produzione, RESQML per i modelli del sottosuolo), e sono quindi più facilmente gestibili e analizzabili utilizzando le tecnologie NoSQL descritte in precedenza. Inoltre, un grande contenuto informativo è presente all'interno di documenti e report non strutturati compilati in cantiere o in impianto, e non memorizzabili o analizzabili direttamente con tecnologie SQL o NoSQL. Numerose tentativi di applicazione delle tecniche di machine learning sono attualmente in corso al fine estrarre informazioni da documenti non strutturati; tali tecniche stanno già ottenendo alcuni buoni risultati nel caso in cui tali documenti possono essere analizzati con tecniche statistiche, legate all'occorrenza di parole chiave riconducibili a dizionari o ontologie, oppure nel caso in cui i documenti siano basati su template in cui la posizione delle informazioni all'interno del documento sono prevedibili a priori. La capacità di interpretare invece dal punto di vista semantico un documento complesso al fine di ricavarne informazioni rappresenta tuttora una frontiera di ricerca.

STATO DELL'ARTE

Per quanto riguarda l'applicazione delle tecniche di Big Data, una delle principali differenze in termini tecnologici è legata alla scelta tra l'utilizzo di un linguaggio di programmazione più librerie di Data Science, oppure l'utilizzo di piattaforme di Data Analytics. Nel primo caso, la scelta di utilizzare linguaggi quali Python e R, con le numerosissime librerie di machine learning disponibili, permette di avere più flessibilità, maggiore possibilità di integrazione e miglior controllo in termini di scalabilità e performance, a discapito di una curva di apprendimento più

lunga e di una capacità di prototipazione più lenta. Nel secondo caso, le capacità di analisi grafica e di definizione di workflow di data processing di molte piattaforme permettono prototipazione più rapida con tempi di apprendimento più brevi, a discapito però di una minor possibilità di personalizzazione e di minor controllo su scalabilità e performance.

Dal punto di vista dello stato dell'arte dell'applicazione delle tecniche di Big Data Analytics nel settore energetico, si evidenziano sia aree applicative più mature, dove l'applicazione di tecniche di machine learning ai dati real time per il monitoraggio della produzione e l'analisi predittiva di guasti ai componenti di impianto si è abbastanza consolidata negli ultimi 2-3 anni, ed aree in cui le applicazioni sono solo allo stato iniziale, in particolare laddove è necessaria un'integrazione tra modelli fisici e modelli data driven al fine di generare modelli predittivi accurati. In particolare, nelle discipline legate all'interpretazione dei dati geologici e geofisici del sottosuolo, stanno emergendo i primi tentativi di affiancare metodi di machine learning ai metodi di processing e di interpretazione tradizionali. Infine, stanno emergendo tecniche legate all'analisi dei documenti non strutturati, in particolare report in testo libero utilizzati per descrivere in maniera più dettagliata situazioni o problemi produttivi, ma sono tuttora limitate alla classificazione e al riconoscimento di particolari tipologie di informazioni all'interno del testo; tali tecniche non sono attualmente generalizzabili per catturare l'intero contenuto semantico del documento.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

Poiché l'evoluzione delle tecnologie e la disponibilità di nuovi algoritmi e nuove librerie sono prevalentemente guidati dalle comunità Open Source, gli investimenti delle compagnie del settore energetico sulla tematica Big Data e Analytics saranno legati a due aspetti: la predisposizione di un adeguato ambiente di calcolo per l'addestramento e l'esecuzione efficace degli algoritmi, e l'attivazione di progetti per applicare gli Analytics alle tipologie di dati del settore.

Per quanto riguarda il primo punto, gli investimenti possono essere variabili, da soluzioni on premise con cluster di calcolo di decine di milioni di euro, a soluzioni su cloud calibrate per le esigenze dei singoli algoritmi, con investimenti nell'ordine di qualche milione di euro sul triennio.

Per quanto riguarda l'attivazione di progetti applicativi, le compagnie potrebbero scegliere di investire sullo sviluppo di competenze interne di machine learning e analytics, in parallelo all'attivazione di società di consulenza specializzate su tali tematiche, con investimenti nell'ordine delle decine di milioni di euro sul triennio, per sfruttare appieno le potenzialità applicative dei Big Data e degli Analytics nel settore energetico.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 2

ROBOTICA NELL'INDUSTRIA PETROLIFERA

I robot sono definiti come "dispositivi che possono sostituire gli esseri umani" nell'esecuzione di compiti ripetitivi, in ambienti pericolosi o in aree non raggiungibili.

È immediato quindi comprendere la rilevanza di questa tecnologia nel campo dell'industria petrolifera, dove i requisiti di sicurezza e efficienza sono essenziali. Inoltre il campo da considerare è estremamente ampio, perché l'industria petrolifera richiede di operare in ambienti considerevolmente diversi e caratterizzati da obiettive difficoltà ambientali, p.es. sottomarino, climi estremi (artici o nel deserto), interno di serbatoi, fondo pozzo, etc..

L'industria O&G da decine d'anni impiega i Remotely Operated Vehicles (ROV) dotati di bracci manipolatori per eseguire operazioni sottomarine, dati gli evidenti vantaggi rispetto all'utilizzo degli operatori (sommozzatori o veicoli manned). Questi sistemi, telecontrollati tramite un cavo dalla superficie, sono attualmente in grado di operare fino a oltre 3000 m, permettendo quindi l'esecuzione delle operazioni necessarie per lo sfruttamento di risorse O&G anche in alta profondità.

Più recentemente, per compiti di monitoraggio sottomarino, sta avendo un forte impulso l'utilizzo degli AUV (Autonomous Underwater Vehicles). Il vantaggio fondamentale degli AUV, rispetto ai ROV, consiste nella mancanza del cavo di collegamento con la superficie, essendo gli AUV dotati di batterie e di un'opportuna "intelligenza" autonoma; questo si traduce in operazioni a mare più economiche e con maggiore produttività del mezzo rispetto ai ROV.

Nel prossimo futuro, oltre alla robotica sottomarina, è prevedibile un incremento diffuso nei diversi ambiti dell'industria O&G, dell'utilizzo di "robot" nell'industria O&G; tale incremento sarà possibile grazie al livello tecnico e all'affidabilità raggiunto dai componenti tecnologici dei sistemi robotici, cioè p.es. computer vision, sensoristica avanzata, computer miniaturizzati e a basso consumo, algoritmi di controllo, intelligenza artificiale, attuatori miniaturizzati, additive manufacturing, droni, etc.

Si può osservare che lo sviluppo in questo campo sarà in gran parte trainato da applicazioni esterne all'industria petrolifera: p.es. si consideri quanto si sta investendo e sviluppando, in aziende e centri di ricerca, per la guida automatica di autoveicoli, con prevedibili ricadute nella filiera complessiva delle tecnologie correlate (visione computerizzata, intelligenza artificiale, etc.).

Per sviluppare efficientemente i robot per l'industria petrolifera sarà quindi necessario monitorare attentamente quanto avviene in altri campi a rapido sviluppo, al fine di cogliere le opportunità di trasferimento tecnologico.

L'adozione di queste innovazioni comporterà notevoli vantaggi in termini di sicurezza e di efficienza, ma richiederà anche modifiche culturali, sia per i lavoratori, sia per i manager.

Gli operatori non dovranno percepire la robotica come una "minaccia", ma un'opportunità per sostituire operazioni manuali con attività di telecontrollo, programmazione e supervisione di "ro-

bot". Il management dovrà comprendere tempestivamente l'evoluzione in atto e avere il coraggio di cambiare, per cogliere con approccio pragmatico tutti i vantaggi delle nuove tecnologie.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

La spinta per un ulteriore, più deciso e ampio sviluppo delle applicazioni robotiche nel campo dell'industria petrolifera deriva dall'impatto positivo su alcuni aspetti di fondamentale importanza per tale industria:

- Maggiore sicurezza per il personale e per l'ambiente, di per sé un valore irrinunciabile per queste attività, che ha inoltre un evidente riflesso positivo sulla reputazione presso l'opinione pubblica e presso gli stakeholder (p.es. amministrazioni locali). Questo obiettivo potrà essere realizzato con robot in grado di sostituire la presenza diretta degli operatori in prossimità degli impianti e con robot in grado di monitorare in continuo e a basso costo l'impatto delle attività O&G sull'ambiente (sia in superficie, sia sottomarino).
- Minori costi (ispezioni più economiche) e riduzione dei tempi di fermata impianto (Non Productive Time). Questo obiettivo richiede lo sviluppo di sistemi robotici a elevato livello di autonomia, in grado di effettuare in modo affidabile compiti ripetitivi di verifica degli asset, con capacità di operare in ambienti estremi (p.es. subsea, artico, all'interno di serbatoi, etc.)
- Realizzazione di estesi sistemi di raccolta dati relativi allo stato degli impianti, gestiti da tecnologie robotiche che possano semplificare la complessità realizzativa (p.es. raccolta dati robotizzata), coniugandosi con l'approccio dell'Internet Of Things. La robotica quindi potrebbe aiutare a cogliere più facilmente i vantaggi delle metodologie "big data", con scopi di ottimizzazione della produzione e/o di realizzazione di manutenzione predittiva.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Al fine di riportare un compendio sintetico, ma che copra tutto il campo dell'industria O&G, nel seguito si riporta l'informazione distinta per ambito applicativo.

Subsea

Nel campo sottomarino possiamo distinguere diverse tipologie di robot:

ROV – veicoli telecontrollati via cavo

AUV – veicoli autonomi, quindi senza cavo e senza collegamento in tempo reale con l'operatore. Tra gli AUV possiamo individuare un sottoinsieme denominato "Glider", che essendo senza eliche (o con eliche di limitata potenza) si muovono nell'acqua in modo simile agli alianti, sfruttando la capacità di "planare" utilizzando anche le correnti per coprire in autonomia distanze molto grandi (migliaia di km), con minimo utilizzo di energia; ovviamente questa modalità di navigazione implica limiti rigidi sulle rotte che possono seguire.

Nel campo dei ROV lo stato dell'arte è già molto soddisfacente. I ROV sono dotati di telecamere e altra strumentazione (p. es. sonar, sistemi di posizionamento, etc.) per consentire all'operatore di guidare il veicolo dalla superficie; inoltre i ROV più grandi sono dotati anche di uno o più bracci

robotici telecomandati dall'operatore. Nel mondo sono disponibili ca. 200 modelli diversi di ROV[1], che vanno da mini-ROV (dimensioni nell'ordine dei 10÷20 cm e cavo ombelicale lungo qualche decina di metri), utilizzati p.es. per l'ispezione delle carene delle imbarcazioni, fino ai grossi "heavy work class" ROV (dimensioni nell'ordine dei metri, profondità massima fino a 6000m, cavo ombelicale fino a 7000 m), per la costruzione e la manutenzione di campi petroliferi, anche ad altissima profondità con presenza di forti correnti.
In Italia esistono aziende che si occupano della costruzione di ROV (p.es. Lighthouse e Saipem).
Lo stato dell'arte mondiale di veicoli AUV comprende diversi modelli[2],[3], che coprono svariate applicazioni, da scopi militari (p.es. contromisura mine), alla rilevazione oceanografica scientifica, fino a scopi di monitoraggio degli impianti O&G (p.es. verifica sealine). In questo ambito i glider stanno conquistando particolari nicchie di utilizzo nelle attività di monitoraggio per applicazioni militari e scientifiche, grazie ai notevoli range di autonomia (migliaia di km).
Per quanto riguarda lo stato dell'arte in Italia, per scopi di monitoraggio ambientale, ispezione e sicurezza, si può citare "Folaga" (Graal Tech), e "Seastick" (Gabri); entrambi possono realizzare anche la modalità di navigazione "glider", a basso consumo. In conclusione, il settore degli AUV è in costante evoluzione in particolare per quanto riguarda sensoristica e le funzionalità autonome di controllo. Tuttavia permane un limite sulla autonomia di navigazione, in funzione della capacità delle batterie di bordo; in ambito R&D, per ovviare a questo limite, si sta pensando di sviluppare stazioni di ricarica "Docking Station" fisse a fondo mare, collegate con la superficie tramite cavo elettro/ottico, dove l'AUV possa ricaricarsi e scaricare i dati raccolti.

Serbatoi, e recipienti a pressione

I contenitori utilizzati nell'industria petrolifera comprendono sia serbatoi (p.es. per contenere i prodotti petroliferi), sia recipienti a pressione, come i separatori acqua/olio/gas.
Per i serbatoi esistono alcune soluzioni innovative, proposte recentemente sul mercato, che permettono di evitare la presenza diretta dell'operatore nell'esecuzione di attività di ispezione e pulizia[4],[5],[6]. Alcuni prodotti rispondono anche alla normativa su sicurezza anti esplosione (ATEX).
In genere si tratta di sistemi filoguidati in grado di aderire e spostarsi sulle pareti del serbatoio, tipicamente tramite ruote magnetiche. La piattaforma viene inserita nel serbatoio tramite un passo d'uomo e viene telecontrollata dall'esterno del serbatoio, tramite un cavetto ombelicale, fornendo quindi l'ispezione visiva. Esistono varianti che permettono anche la pulizia della superficie e l'ispezione NDT (Non Destructive Testing, p.es. con ultrasuoni). Importante notare anche la disponibilità di droni aerei che, introdotti attraverso un passo d'uomo, possono spostarsi liberamente all'interno del vessel, permettendo l'ispezione visiva controllata dall'operatore esterno via radio, con un ripetitore posto in prossimità del passo d'uomo.

1 http://www.rov.org/industry_manufacturers.cfm
2 http://auvac.org/
3 https://nerc.ukri.org/innovation/activities/energy/offshore/catalogue-of-auvs/
4 https://inspection-robotics.com/category/products/mobile-robotics/
5 http://www.wolftank.com/en/top-navigation/tank-cleaning-robots-no-man-entry/11-174.html
6 http://www.in-robotics.com/solution.html

Una problematica a parte riguarda ispezioni all'interno di serbatoi in pressione eseguite senza provvedere alle consuete operazioni di fermo impianto e bonifica dell'ambiente di lavoro. Una tale capacità permetterebbe di eseguire il monitoraggio interno senza, oppure con un minimo impatto sulla produzione.
Sebbene l'impatto economico di questa applicazione sarebbe rilevante, non esistono attualmente sul mercato soluzioni tecnologiche soddisfacenti.

Perforazione

L'attività di perforazione richiede il sollevamento e la movimentazione di attrezzature (p.es. aste lunghe 10-30 m, pesanti alcune tonnellate), in prossimità della bocca pozzo, dove la presenza di alcuni operatori è attualmente necessaria per guidare la movimentazione e garantire il corretto posizionamento delle aste. A livello mondiale, in particolare in Norvegia, sono in corso progetti di innovazione finalizzati allo sviluppo di sistemi di perforazione completamente robotizzati, eliminando quindi la presenza degli operatori dall'area più pericolosa.

Impianti O&G

In questi impianti vengono effettuate frequenti attività di ispezione di varia complessità realizzate da operatori che devono muoversi quindi tra tubazioni, serbatoi, valvole, etc. eventualmente salendo su apposite scale per ispezionare apparecchiature in altezza. Al minimo si richiedono verifiche visive sulla presenza di eventuali anomalie, ma ulteriori requisiti possono comprendere la verifica di corrosione e il monitoraggio di potenziali perdite.

Per sostituire la presenza diretta degli operatori nell'impianto, sono stati recentemente sviluppati (Europa e USA) a livello R&D alcuni robot capaci di muoversi nell'impianto utilizzando ruote/cingoli: dotati di telecamere, opportuni sensori e in certi casi anche di un braccio manipolatore, tentano di riprodurre le capacità dei veicoli ROV sottomarini. Il robot, di forma pressoché cubica di lato 50 ÷ 100 cm, dotato di batterie, si muove nell'impianto radiocomandato dall'operatore che resta nella "control room" remota, con evidenti vantaggi in termini di sicurezza e confort. Il limite fondamentale di tali robot consiste nella estrema difficoltà ad affrontare percorsi con gradini/scale, rendendo le attività in altezza impossibili o comunque molto complesse.
Per superare questo limite, si sta sviluppando negli impianti O&G l'utilizzo di droni aerei per l'ispezione, survey e mapping, sicurezza e risposta alle emergenze. Di norma tali droni sono forniti di telecamere nel visibile e nell'infrarosso (termiche). Particolari telecamere, sensibili a specifiche lunghezze d'onda nell'infrarosso, sono in grado di evidenziare perdite di idrocarburi gassosi. Esempi di utilizzo riguardano l'ispezione di fiaccole, il survey pipeline o di siti potenzialmente inquinati. Tuttavia, attualmente i droni soffrono ancora di limiti che ne precludono una più ampia applicazione finalizzata alla effettiva riduzione della presenza degli operatori in impianto. In particolare si può notare la quasi assenza di droni che rispondano alle normative ATEX (per lavorare in atmosfera a rischio esplosione) e la scarsa autonomia di volo (ca. 30'), che richiede il frequente intervento dell'operatore per il cambio batterie.

RISORSE ECONOMICHE STIMATE

La tecnologia prioritaria è caratterizzata da investimenti mirati al trasferimento tecnologico e allo sviluppo di sistemi prototipali che dimostrino i vantaggi nelle applicazioni pratiche. Ci si attende che gli sviluppi siano il risultato di collaborazioni tra le aziende proprietarie degli asset (p.es. impianto di produzione sottomarino, centri trattamento olio/gas, raffinerie, etc.) e i fornitori di servizi che, in un mercato internazionale e competitivo, provvedono a attività necessarie e critiche per il funzionamento degli impianti (p.es. ispezioni specializzate). Sarà necessario trarre vantaggio dal supporto delle Università/Centri di Ricerca italiani, molti dei quali caratterizzati da livelli di eccellenza sulle tecnologie robotiche.

Gli investimenti necessari sono diversificati in base ai diversi ambiti esaminati: impianti sottomarini, perforazione, serbatoi e recipienti a pressione, impianti O&G.

Si consideri p.es. che gli sviluppi di robotica sottomarina sono necessariamente caratterizzati da alti costi, sia per l'utilizzo di componentistica marina, sia per la logistica dei test a mare. In questo campo le necessità sono nel range dei 10÷20 M€. Anche i sistemi di perforazione robotizzata richiedono costi rilevanti per i test in campo, ma si deve considerare che in questo ambito gli sviluppi tecnologici sono già abbastanza avanzati, si tratta quindi principalmente di realizzare l'integrazione di tecnologie.

Lo sviluppo della robotica per gli impianti, sia nell'ambito ispezione serbatoi a pressione, sia nell'ambito ispezione esterna degli impianti, implica investimenti minori.

Le risorse necessarie complessive si possono stimare in 40 milioni di euro per i prossimi tre anni.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 3

APPLICAZIONE DELLA TECNOLOGIA BLOCKCHAIN NEL DEMAND-RESPONSE

In un'epoca in cui il trend sul digitale abilita nuovi servizi e rivoluziona i modelli di business, garantire la sicurezza di dati e informazioni e la loro tracciabilità appare sempre più importante e la tecnologia blockchain è la risposta più adeguata alle sfide emerse sul fronte della sicurezza, trasparenza, interoperabilità e privacy.

La blockchain nasce come protocollo legato alla criptovaluta Bitcoin, nel gennaio 2009, appena pochi mesi dopo la crisi finanziaria del 2008. La parola Bitcoin è stata utilizzata per la prima volta da Satoshi Nakamoto nel suo celebre white paper del 2008 intitolato "Bitcoin: a Peer-to-Peer Electronic Cash System".[7] Il white paper introduce e descrive una valuta digitale, il cui scambio avviene direttamente tra le due parti, senza l'ausilio di un terzo intermediato fidato. Il meccanismo che abilita il trasferimento della criptovaluta è la blockchain, un registro condiviso o un libro mastro di tutte le transazioni (ledger), distribuito su tutti i nodi (node) di un network decentralizzato e peer-to-peer. Ogni modifica di questo registro è eseguita dai cosiddetti "minatori" (miners), i quali aggiungono i blocchi uno dopo l'altro, legandoli in sequenza ed in ordine temporale, inserendo indelebilmente e in maniera cifrata all'interno di questi blocchi le transazioni che ricevono dagli utilizzatori del Bitcoin.

In sintesi, la blockchain è un registro pubblico e distribuito, condiviso tra una rete di nodi peer-to-peer, costituito da una catena di blocchi cronologicamente ordinati e protetti da crittografia: i dati in esso contenuti sono immutabili, con un timestamp, cifrati, scambiabili, tracciati e non replicabili.

A partire dal mondo delle criptovalute, la blockchain rivela la sua significativa portata innovativa in altri contesti rivoluzionando i sistemi di pagamento e potenzialmente qualunque processo in cui è richiesto un elevato livello di sicurezza, automazione, affidabilità.

In parallelo, si diffondono gli "smart contract" o contratti intelligenti, dei protocolli informatici capaci di replicare in chiave digitale le disposizioni frutto di una negoziazione tra due o più parti, o clausole contrattuali, senza intermediari, nonché di verificare ed eseguire automaticamente le stesse clausole pattuite.

Gli smart contract sono dei contratti tradotti in linguaggio di programmazione, eseguibili da un computer e che applicano in automatico, quindi senza un intervento esterno, le clausole in essi contenute. Al pari di un tradizionale contratto cartaceo, uno smart contract può includere al suo interno delle disposizioni concernenti gli obblighi, i benefici e le sanzioni a carico o a vantaggio delle parti contraenti nelle diverse circostanze. Inoltre, uno smart contract può essere predisposto per la ricezione di informazioni come input, l'elaborazione delle stesse sulla base delle regole definite dal contratto e l'esecuzione di azioni come output.

7 Disponibile online su: https://bitcoin.org/bitcoin.pdf [Ultimo accesso 5 luglio 2018].

Il concetto di smart contract si compone di tre parti:

a. L'espressione di una logica contrattuale attraverso un codice di programma;
b. La rappresentazione degli eventi che attivano la logica come messaggi inviati al programma stesso;
c. Un meccanismo che ponga in essere gli effetti previsti dalla logica (per esempio, l'effettuazione di un trasferimento di denaro da un contraente all'altro).

Una volta che un contratto è diventato uno smart contract e i contraenti concordano nell'accettarne le clausole, gli effetti non sono più legati alla loro volontà ma alle condizioni definite nel testo del contratto.

Blockchain nel Demand response

L'applicazione della blockchain al "demand response" si fonda sul presupposto del ricorso del gestore della rete al Mercato per il Servizio di Dispacciamento (MSD). In questo caso, la riduzione volontaria dei consumi da parte di utenti del sistema elettrico può essere utilizzata come servizio di rete al fine di bilanciare domanda e offerta in una specifica zona di mercato e in una determinata ora del giorno. La certificazione dell'offerta di risorse, determinata da utenti con uno specifico profilo di domanda che si dichiarano disponibili a ridurre il carico, e dell'effettiva transazione, ovvero della quantità di energia di cui la domanda - il Transmission System Operator (TSO), ovvero Terna in Italia - si approvvigiona richiedendo una riduzione, è il principale punto di forza che la blockchain potrebbe offrire alle aziende energetiche (ad esempio utilities) che fungerebbero da aggregatori di domanda per offrire il servizio richiesto. Ad oggi, la riduzione nei consumi per finalità di regolazione del sistema elettrico, è perseguito attraverso la contribuzione esclusiva di grandi clienti del settore che, a seguito dell'accesso al regime di "interrompibilità", possono essere valorizzati per la propria riduzione del prelievo. Non vi è pertanto estensione di questa tipologia di servizi a tutto il mondo dei medio/piccoli consumatori (es. utenze business e retail).

Il caso d'uso prevede la realizzazione di un'infrastruttura blockchain attraverso cui registrare la riduzione puntuale nei consumi di ciascun partecipante (cliente business o retail) ed automatizzare la remunerazione degli stessi in funzione della riduzione effettivamente "fornita al sistema".

Il caso si concretizza, pertanto, in un programma di incentivazione volto a remunerare la riduzione nei consumi e a consentire una diminuzione del carico sulla rete. L'intero sistema beneficerà dell'assenza di sovraccarichi: il TSO avrà a disposizione un ulteriore mezzo di gestione dei carichi sulla rete – con i conseguenti benefici di costo derivanti dall'aumento dell'offerta per uno stesso servizio – e la Società di Vendita, che potrà fungere da aggregatore dei segnali e delle richieste di riduzione della domanda dal TSO e verso gli utenti finali, potrà disporre di dati certificati, real time ed immutabili sulla riduzione dei consumi.

La tecnologia Blockchain costituisce il layer su cui si basa la sperimentazione e consente di:

- disporre di dati certificati e trasparenti sui consumi;
- automatizzare la remunerazione in funzione di quanto registrato.

a) Disporre di dati certificati sulla riduzione dei consumi

La tecnologia blockchain, coadiuvata da smart meter per la misurazione dei consumi, consente di registrare all'interno di un registro distribuito i consumi di energia elettrica degli utenti (business / retail). La trasparenza è garantita nei confronti di tutti gli attori coinvolti in quanto i dati sono distribuiti ed immutabili.

b) Automatizzare la remunerazione in funzione di quanto registrato

L'esecuzione di clausole contrattuali secondo quanto registrato è perseguibile attraverso la predisposizione di uno smart contract. Lo smart contract dovrà essere predisposto per calcolare la riduzione dei consumi da parte del consumatore finale e per remunerare il cliente in funzione di quanto effettivamente ridotto, applicando quindi degli algoritmi per validare e rendere effettive le condizioni di "chiamata" a fornire il servizio ai diversi utenti e per regolare la remunerazione dello stesso.

Al verificarsi di determinate condizioni, lo smart contract selezionerà gli utenti candidati a ridurre il carico e applicherà le specifiche condizioni tariffarie regolando e notarizzando in blockchain la transazione. Occorrerà, quindi, definire delle logiche di remunerazione in funzione della riduzione dei consumi e tramutarle in un linguaggio informatico atto ad automatizzare l'esecuzione delle clausole contrattuali.

MOTIVAZIONE PER LO SVILUPPO

In molteplici mercati energetici i gestori delle reti di trasmissione dell'energia elettrica fronteggiano crescenti difficoltà per garantire flessibilità e bilanciamento sulla rete.

In particolare, il carattere variabile della generazione elettrica derivante dalla crescente penetrazione di fonti rinnovabili non programmabili (soprattutto solare e eolico) tende a rafforzare le richieste di bilanciamento real time, al fine di conciliare correttamente domanda e offerta di energia elettrica sulla rete, mitigando i rischi di sovraccarichi, congestioni e/o black-out.

I benefici perseguibili tramite misure che garantiscano una maggiore flessibilità all'interno del sistema sono concreti. A titolo esemplificativo, nel 2016 in Germania il TSO ha speso circa 800 milioni di euro[8] per misure atte a garantire il corretto bilanciamento della rete. In Italia, il costo sostenuto da Terna per assicurare il corretto bilanciamento della rete, remunerando le risorse che offrono servizi di rete sul MSD e che rientrano all'interno del corrispettivo uplift (che ricade in ultima istanza sull'utente finale del sistema elettrico), è stato pari a circa 2 miliardi di euro.[9]

La richiesta per servizi di flessibilità, attraverso i quali sia possibile bilanciare domanda e offerta di energia elettrica nel breve periodo sta aumentando e la blockchain può costituire una tecnologia capace di abilitare la fornitura di tali servizi registrando la disponibilità di nuove risorse sulla rete (quali ad esempio la domanda) ed automatizzando le modalità con cui queste vengono coinvolte.

8 Fonte: Report Eurelectric 2018 – "Blockchain in Electricity: a Critical Review of Progress to Date".

9 Fonte: Relazione finanziaria annuale Terna 2017.

In sintesi, la blockchain è considerata disruptive proprio per le trasversalità della tecnologia in diversi settori del mercato, i molteplici vantaggi e la numerosità dei campi di applicazione. Si tratta di un abilitatore di trasparenza capace di realizzare una disintermediazione delle value chain e di ribaltare il paradigma secondo cui solo un controllo fisico può garantire la sicurezza dei dati.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

La blockchain come tecnologia abilitante per il servizio di "demand response" è già una realtà in alcuni paesi esteri, che negli ultimi anni hanno assistito alla proliferazione di aziende e start-up interessate ad investigare il potenziale dell'applicazione.

Tra i progetti presenti a livello europeo è possibile citare il pilota guidato da TSO TenneT[10] ed il progetto della start-up inglese Electron.

In particolare TenneT, in partnership con Vandebron, Sonnen ed IBM, ha sviluppato un pilota finalizzato ad aumentare la flessibilità di gestione dei carichi sulla rete sfruttando la capacità delle batterie dei veicoli elettrici (applicazioni Vehicle to Grid). La tecnologia blockchain ha consentito la partecipazione dei veicoli elettrici al sistema registrando la loro capacità ed il loro contributo in funzione dei segnali ricevuti da TenneT.

La start-up inglese Electron, invece, utilizzando la tecnologia blockchain ha sviluppato un sistema decentralizzato di "demand-response" premiato nel 2017 dal governo inglese nell'ambito dell'Energy Entrepreneurs Fund. L'azienda ha da poco fondato un consorzio per lo sviluppo congiunto e la commercializzazione della piattaforma.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE[11]

L'applicazione della tecnologia blockchain al servizio di "demand response" è ancora in fase sperimentale e pertanto, richiede un investimento preventivo in uno o più progetti pilota volti a testarne le funzionalità in via preliminare all'introduzione della soluzione sul mercato.

In particolare, si ritiene che per la predisposizione di un pilota, volto a testare le funzionalità della soluzione possa richiedere un investimento di circa € 40.000,00 - € 60.000,00.

Tali costi, orientativi e frutto di analisi preliminari, sarebbero necessari per la predisposizione di un'infrastruttura blockchain a supporto dei nuovi modelli di servizio (attualmente già in fase di sperimentazione tecnica da parte di terna con i progetti pilota UVAC e UVAM), la definizione e realizzazione di uno Smart Contract per l'esecuzione automatica delle clausole contrattuali ed il test della soluzione in ambiente controllato (Proof of Concept).

A valle della validazione dell'applicazione pilota è necessario sostenere un ulteriore investimento per eseguire il roll-out della soluzione. In particolare, per adattare l'infrastruttura blockchain al dimensionamento della base clienti si stima un valore che in via preliminare potrebbe ammontare a circa € 500.000,00 - € 800.000,00.

A tale importo, si sommano i costi relativi al mantenimento dell'infrastruttura blockchain ed i

10 Tennet TSO GmbH.

11 Valutazione preliminare orientativa. Per la valutazione reale dei costi e degli investimenti privati e pubblici funzionali al pieno e concreto sviluppo tecnologico della soluzione saranno necessari approfondimenti tecnici di dettaglio.

costi associati ai nodi attivi che ammonterebbero a circa € 400.000,00-800.000,00 annui.
Tali costi sono stati stimati non considerando il costo degli smart meter necessari alla registrazione dei consumi ed ipotizzando un numero di nodi attivi della Blockchain di circa 20 – 30 unità.
L'investimento complessivo richiesto, complessivo dei costi di gestione dell'infrastruttura per il periodo di un anno, è di circa € 1 - €1,5 milioni.[12]

12 I costi sono stati stimati assumendo che la registrazione dei consumi sia effettuata sulla base dei dati rilevati dagli smart meter che alimentano la notarizzazione in Blockchain sul nodo del venditore.
I dati registrati in Blockchain saranno disponibili per le verifiche del cliente tramite un front-end ad-hoc.

2. ACCUMULO DI ENERGIA

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 4

ACCUMULO ELETTROCHIMICO E BATTERIE IN FLUSSO

L'accumulo elettrochimico di energia è un metodo utilizzato per immagazzinare l'elettricità sotto forma chimica. Questa tecnica di stoccaggio beneficia del fatto che sia l'energia elettrica che quella chimica condividono l'elettrone come portatore di carica e ciò consente di limitare le perdite dovute alla conversione da una forma all'altra, aumentando così l'efficienza del processo di immagazzinamento dell'energia. La maniera più facile per accumulare energia elettrica è rappresentata dagli accumulatori elettrochimici. Gli accumulatori elettrochimici, comunemente noti come batterie ricaricabili, possono rilasciare/immagazzinare energia elettrica attraverso reazioni reversibili di ossidazione e riduzione che avvengono sui loro elettrodi. La prima batteria fu scoperta da Volta nel 1787 ma dobbiamo aspettare il 1859 affinché venisse inventato da Gaston Planté il primo accumulatore ricaricabile: la batteria al piombo acido. Le batterie al piombo, anche se con numerose modifiche di natura tecnologica, trovano ancora numerosi impieghi, presentando buona affidabilità, tensione di cella elevata, buona efficienza coulombica, e soddisfacente vita ciclica. Grazie a queste caratteristiche è attualmente tra i sistemi elettrochimici più diffusi. Inoltre, data l'elevata disponibilità del piombo, questo sistema di accumulo risulta non particolarmente costoso. Le batterie al piombo sono adatte per applicazioni di accumulo di media e grande taglia in quanto offrono una buona combinazione di parametri di potenza/energia e un prezzo contenuto. Il loro principale utilizzo è in campo motoristico per avviare i motori termici e consentire l'uso delle utenze elettriche di bordo. Il principale svantaggio di queste batterie è rappresentato dall'elevato peso del piombo che riduce drasticamente la densità di energia specifica a valori di 30-50 Wh/kg. Le batterie al piombo sono rimaste l'unico sistema di accumulo elettrochimico per oltre quarant'anni. Fu, infatti, nel 1899 che lo svedese Waldemar Jungner creò la prima pila al nichel-cadmio (Ni-Cd). La batteria al Ni-Cd offriva diversi vantaggi rispetto al piombo ma il sistema, per diventare competitivo da un punto di vista industriale, necessitava di ulteriori accorgimenti. Gli sviluppi furono lenti, ma nel 1932 furono ottenuti progressi per depositare i materiali attivi dentro i pori di un elettrodo placcato in nichel. Ulteriori miglioramenti si sono verificati nel 1947 per assorbire i gas generati durante la carica, che ha portato alla moderna batteria Ni-Cd sigillata. Per molti anni, la batteria Ni-Cd è stata la scelta preferita per le batterie ricaricabili, le apparecchiature mediche di emergenza, le videocamere professionali e gli elettroutensili. Alla fine degli anni '80, l'altissima capacità raggiunta dalla tecnologia delle batterie Ni-Cd ha reso questo tipo di batterie estremamente popolari. In seguito questo tipo di batteria è stata gradualmente eliminata a favore di batterie ad idruri di metallo (Ni-MH) che presentano caratteristiche prestazionali e di sicurezza ambientali superiori. La batteria Ni-MH è stata brevettata nel 1986 da Stanford Ovshinsky, fondatore dell'Ovonics. In questa batteria l'anodo di cadmio è sostituito da una lega metallica capace di formare idruri (nor-

malmente a base di lantanidi). La densità di energia è più che doppia rispetto al piombo e del 40% superiore a quella delle Ni-Cd. Le batterie Ni-MH, dopo aver sostituito le batterie Ni-Cd in applicazioni consumer hanno cominciato a trovare impiego in applicazioni automotive in quanto accettano velocità di carica e scarica molto elevate. A causa della presenza delle terre rare nell'elettrodo negativo le batterie Ni-MH sono più costose di quelle al piombo o al Ni-Cd. La loro diffusione è stata però offuscata dall'entrata in scena di un competitore molto performante: la batteria al litio. Il litio infatti ha numerose e interessanti proprietà che lo rendono particolarmente adatto per il funzionamento di una batteria. È il più leggero di tutti i metalli ed ha il più alto potenziale elettrochimico. Di conseguenza presenta, tra tutti gli elementi, la maggiore densità di energia gravimetrica. La sperimentazione con batterie al litio è iniziata nel 1912 sotto G.N. Lewis, e negli anni '70 arrivarono sul mercato le prime batterie al litio. Occorre però attendere fino al 1988 per avere in commercio le prime batterie al litio ricaricabili per merito della Moli-Energy Canada. Questa batteria fu utilizzata nei telefoni cellulari in Giappone, ma l'anno successivo all'introduzione sul mercato l'esplosione del telefono di uno degli utenti causò il ritiro dal commercio di oltre 1,5 milioni di batterie. Infatti, pur se le batterie al litio metallico si erano dimostrate sicure in laboratorio, la formazione di dendriti durante la ricarica ha portato a un corto circuito e alla deriva termica del sistema. Il richiamo delle batterie ed il risarcimento dei danni hanno poi portano al fallimento della compagnia. Parallelamente si stava studiando un'altra tipologia di batterie al litio caratterizzate dall'assenza di litio metallico. In queste batterie il litio rimane sempre sotto forma ionica e per tale ragione queste batterie vennero chiamate Li-ione. Nel 1985 un gruppo di ricerca gestito da Akira Yoshino della Asahi Chemical, in Giappone, riuscì a costruire il primo prototipo di batteria Li-ione e nel 1991 la Sony commercializzò la prima batteria agli ioni di litio. In seguito numerosi produttori di batterie hanno sviluppato e venduto le proprie versioni di batterie agli ioni di litio ricaricabili. Versatile e altamente scalabile, la batteria Li-ione può essere adattata praticamente a qualsiasi esigenza di tensione, potenza ed energia. Oltre a questi sistemi di accumulo che lavorano a temperatura ambiente, occorre menzionare le batterie ad alta temperatura: le batterie sodio-zolfo (NaS) e le batterie tipo Zebra. Le batterie NaS sono state originariamente sviluppate da Ford Motor Company nel 1960 e, successivamente, la tecnologia è stata venduta alla società giapponese NGK che attualmente produce sistemi per applicazioni stazionarie. I sistemi operano ad alta temperatura, compresa tra 300 e 350 °C. L'efficienza coulombica è di circa il 90% mentre la vita ciclica è intorno ai 2.500 cicli. La tecnologia delle batterie NaS è stata dimostrata in oltre 190 siti in Giappone. Queste batterie risultano particolarmente efficaci per stabilizzare la produzione di energia rinnovabile e fornire servizi ausiliari alla rete elettrica. La batteria Zebra utilizza al posto dello zolfo il cloruro di nichel come elettrodo positivo. Questo è intrinsecamente più sicuro e ha permesso la realizzazione di celle di maggiori dimensioni. Le prestazioni ottimali si raggiungono nell'intervallo di temperatura compreso tra 270 e 350 °C. La batteria ZEBRA trova applicazioni in campo automobilistico sia in veicoli ibridi che elettrici puri. È la sola ad essere un sistema completamente autonomo completo di imballaggio, gestione termica e un sistema di gestione della batteria controllato da microprocessore che fornisce un'interfaccia al sistema di azionamento del veicolo. La costruzione monoscocca rende estremamente robusta la batteria, come evidenziato dal fatto che essa ha superato tutti i test di sicurezza ideati dai costruttori europei. Essa è anche uti-

lizzata nel campo delle telecomunicazioni e per la propulsione sottomarina. Con l'avvento della più recente tecnologia al litio l'entusiasmo per queste batterie ad alta temperatura sta cominciando lentamente a scemare. In futuro si prevede che le batterie al litio potranno essere ancora più performanti. Tra le innovazioni più significative occorre ricordare l'uso di anodi di silicio. L'anodo di silicio nanometrico ha una capacità teorica di oltre 10 volte rispetto all'anodo di grafite. Alcuni dei principali attori nel mercato globale delle batterie anodiche al silicio sono Amprius, Inc. (USA), Panasonic Corp (Giappone), Samsung SDI e LG Chem (Corea del Sud). Un'alternativa alle batterie Li-ione, in corso di ricerca e sviluppo in vari laboratori mondiali, è la batteria basata su ioni sodio. Grazie all'abbondanza del sodio sulla crosta terrestre questo tipo di batteria potrebbe diminuire notevolmente i costi di produzione pur garantendo prestazioni simili rispetto alle classiche batterie al litio.

Le batterie in flusso, in studio presso il Centro Ricerche ENI di Novara, sono caratterizzate da una particolare architettura che consente l'accumulo di energia usando due soluzioni elettrolitiche (anolita – catolita) separate da una membrana a scambio ionico. Si tratta di batterie ricaricabili che operano allo stato liquido. Le soluzioni dell'elettrolita positivo e negativo sono contenute in due serbatoi e sono messe in circolazione da una pompa che favorisce lo scambio ionico sulla superficie degli elettrodi regolando il flusso che scorre dai serbatoi alle camere di reazione a ciclo chiuso. La loro caratteristica principale è il disaccoppiamento della potenza e dell'energia erogate: essendo la potenza funzione delle costanti di reazione, questa è legata alle prestazioni degli elettrodi; invece la capacità di accumulo e quindi l'energia immagazzinabile è legata alla capienza dei serbatoi. Questo disaccoppiamento consente la gestione (potenziamento/scale-up) indipendente dei parametri di potenza ed energia specifiche. Inoltre, l'immagazzinamento di energia in serbatoi esterni limita l'auto-scarica dei reagenti. Esistono diverse tipologie di batterie in flusso: al vanadio, al vanadio/bromo, al ferro/cromo, allo zinco/bromo e ancora altre si fanno avanti studi di specie attive organiche (idrochinoni; metallo-piridili, ecc.) ma sono decisamente agli albori. Di recente sono apparsi in letteratura i primi studi sulle batterie in flusso semisolide, che utilizzano elettroliti dispersi in paste fluide a base di carbone e che avrebbero il vantaggio di aumentare di molto la densità delle specie attive. Attualmente, nel mondo sono installati circa 20 MW di batterie in flusso, tra queste circa 19 MW impiegano come specie attiva sali di vanadio (Vanadium Redox Flow Battery - VRFB). Il vanadio disciolto in soluzione acida, è presente in quattro stati di ossidazione: V^{2+}/V^{3+} come elettrolita nel comparto negativo, V^{4+}/V^{5+} (presente come VO^{2+}/VO_2^{+}) in quello positivo. L'utilizzo di un'unica specie chimica nei due comparti della cella consente di ridurre i problemi di cross-contaminazione, ovvero la migrazione degli ioni metallici attraverso la membrana a scambio ionico. La cella costituisce il cuore della VRFB, nonché la parte che determina la potenza del sistema. La membrana a scambio ionico nella cella consente di separare le soluzioni, permettendo solo il passaggio dei portatori di carica per il bilanciamento delle reazioni. Tale membrana, oltre a minimizzare il trasporto di materia deve anche garantire una bassa caduta ohmica. Gli elettrodi nelle VRFB sono tipicamente di materiale poroso a base di carbonio (feltri porosi). Ciò assicura buona conducibilità elettrica e resistenza alla corrosione. La porosità degli elettrodi porta ad avere una alta superficie attiva dove poter far avvenire le reazioni e assicura lo spazio necessario per i flussi di liquido onde evitare limitazioni di trasferimento di materia. I serbatoi di

stoccaggio degli elettroliti e le pompe completano il sistema della VRFB. Il serbatoio contenete la soluzione del comparto negativo deve rimanere stagno per evitare la presenza di ossigeno che ossiderebbe spontaneamente la specie V^{2+} portando ad una diminuzione di capacità del sistema. Le pompe assicurano il flusso dei reagenti all'interno della cella durante il funzionamento. Tale flusso dovrà garantire elevate prestazione alla batteria e al tempo stesso minimizzare i consumi elettrici per non inficiare l'efficienza globale del sistema. Nonostante la bassa densità energetica delle soluzioni al vanadio utilizzate (30-40 Wh/L), le VRFB risultano essere le batterie a flusso più studiate e con maggiori realizzazioni industriali. Tale tecnologia risulta interessante per sistemi stazionari di taglia medio-grande (10 kW - 1 MW).

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

I sistemi di stoccaggio elettrochimico dell'energia sono di importanza fondamentale nello sviluppo di tecnologie energetiche sostenibili. Affinché le fonti di energia rinnovabile possano essere poste alla base del nostro sistema energetico, occorre necessariamente accoppiarle con metodi di stoccaggio dell'energia elettrica efficienti e affidabili. Infatti uno dei principali problemi per l'uso di energia da fonti rinnovabili è legato alla loro intermittenza, che porta a grandi fluttuazioni nell'energia erogata. L'accoppiamento di tecnologie di immagazzinamento dell'energia con i sistemi di produzione da fonte rinnovabile risulta imperativo per rendere queste ultime applicabili alla rete elettrica.

Le batterie in flusso hanno il pregio di essere di semplice concezione, caratterizzate dal disaccoppiamento della potenza erogabile dall'energia immagazzinata e dalla modularità dimensionale. Il fatto che potenza ed energia possano essere dimensionate in modo indipendente rende queste batterie particolarmente flessibili e adattabili ad applicazioni varie, inoltre la presenza di un'interfaccia solido (elettrodi) – liquido (elettrolita) rende la batteria in flusso particolarmente rapida nella risposta (frazioni di secondo) come richiesto in molte applicazioni pratiche. Le VRFB sono da poco divenute commerciali in Giappone dove su grande scala ha operato la SUMITOMO, che produce container di alta potenza ed energia della lunghezza di 12 m; con una potenza in uscita di 125 kW ed una capacità di 500 kWh. In USA è presente dal 2008 PRUDENT ENERGY, azienda leader nel settore delle VRFB che dichiara 50 sistemi installati nel mondo. Il modulo base, lungo 9 m, è di 250 kW estendibile fino a 10 MW. Le VRFB hanno tuttavia densità di energia (40 Wh/L) ed anche energia specifica (20 Wh/kg) relativamente basse per ragioni intrinseche di solubilità dei Sali di vanadio. Un'opportunità per aumentare la densità energetica della batteria in flusso è di utilizzare un materiale elettro-attivo disperso nell'elettrolita, cioè di produrre un conduttore semisolido che scorre nella batteria e che faccia da supporto alla specie attiva. In letteratura da qualche anno sono apparse ricerche volte allo studio di sistemi costituiti da miscele di carbonio particolato e di materiale attivo. In tale caso la concentrazione del materiale attivo potrebbe raggiungere le 40 moli per litro di elettrolita, aumentando la densità energetica fino ad 1 ordine di grandezza rispetto al caso del vanadio standard.

Per quanto riguarda invece il passaggio dal veicolo termico a quello elettrico, al fine di ridurre le emissioni di carbonio, questo richiede sufficiente energia a bordo per garantire l'autonomia del veicolo. Si prevede che il mercato globale delle batterie agli ioni di litio avrà un valore di 77,42 mi-

liardi di dollari USA entro il 2024. La richiesta di batterie agli ioni di litio è massima per valori di capacità compresa tra i 5 e 25 Wh. Le batterie da 5-25 Wh sono utilizzate negli smartphone e questo è il motivo principale alla base della loro crescente domanda. Il tasso di crescita più veloce sarà tuttavia testimoniato dal segmento di potenza 18-28 KWh a causa del loro utilizzo nei veicoli elettrici. Per aree geografiche, l'Asia-Pacifico continuerà a essere leader nel mercato. Basandosi invece sull'aspetto applicativo, il segmento dell'elettronica di consumo emergerà dominante a causa della crescente domanda e del calo dei prezzi degli smartphone. Il passaggio all'elettrotrazione urbana può creare importanti opportunità di crescita per il mercato delle batterie agli ioni di litio. Infatti, la tendenza dell'industria automobilistica verso l'uso di carburanti sostenibili sta fortemente spingendo la ricerca verso veicoli elettrici alimentati da batterie e ciò rappresenterà un altro incentivo per la produzione massiva di batterie Li-ione. La quantità di veicoli che utilizzano batterie agli ioni di litio per lo stoccaggio di energia a bordo è in aumento e le case automobilistiche stanno ora concentrandosi su come possono ridurre i costi aumentando la densità di energia e la gamma di veicoli. Ad oggi si raggiungono densità energetiche di 400 kWh/kg (Toyota). Il mercato globale delle batterie agli ioni di litio per veicoli dovrebbe aumentare passando da $ 7,8 miliardi nel 2015 a $ 30,6 miliardi nel 2024.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Tra le diverse tecnologie di batterie, quelle agli ioni litio rappresentano senza dubbio le più promettenti. Questo tipo di batterie è stato sviluppato principalmente in Asia ed il loro mercato è molto consolidato. La Panasonic Corporation, Samsung SDI Co. Ltd. e LG Chem Power Inc. rappresentano i tre principali produttori di batterie al litio. Lo scorso anno queste tre società hanno prodotto batterie che hanno coperto circa il 57% del mercato. La strategia di questi gruppi, che consiste nell'offrire servizi dedicati ai propri clienti a costi competitivi, é utilizzata per attrarre nuovi clienti in modo da continuare ad essere leader di mercato. Parallelamente questi produttori stanno anche sviluppando nuovi materiali di lavoro specifici per le applicazioni, che li aiuta ad ottenere un vantaggio superiore agli altri. Altre realtà importanti operanti sul mercato sono la Hitachi Chemical Corporation, Johnson Controls Inc., Toshiba Corporation, GA Yuasa Corporation e Automotive Energy Supply Corporation (ASEC). Queste società stanno collaborando tra loro o con altre società al fine di acquisire maggiori quote di mercato. Negli Stati Uniti la Tesla/Panasonic ha iniziato la costruzione di una fabbrica di batterie agli ioni di litio (Gigafactory 1) nella Storey County (Nevada) per alimentare auto elettriche. La fabbrica ha iniziato la produzione limitata di Powerwalls e Powerpack, per impieghi domestici, nel primo trimestre del 2016 utilizzando batterie Panasonic prodotte altrove ed ha iniziato la produzione di massa di celle nel gennaio 2017. Attualmente si registrano una serie di problemi che stanno ritardando i piani di sviluppo della Gigafactory 1. Elon Musk, il fondatore di Tesla ha annunciato anche la costruzione di altre Gigafactory: la SolarCity Gigafactory a Buffalo (New York) e l'Europa Gigafactory in Germania. Mentre l'istituzione di una catena di produzione nazionale di batterie al litio da parte dei produttori europei è l'opzione ovviamente preferita per affrontare questo svantaggio competitivo, i produttori di celle coreane hanno già colto l'opportunità e stanno attualmente stabilendo una capacità di produzione di celle in Europa. Entro il 2020 almeno sette nuove fabbriche di batterie sono previste in Europa. Queste

strutture saranno in grado di produrre batterie per un totale di 80 GWh all'anno. Dei cinque principali produttori mondiali di batterie agli ioni di litio, quattro stanno pianificando, o hanno iniziato a costruire, Gigafactory in Europa: LG Chem, Samsung, SK Innovation, e la partnership di Tesla/Panasonic. Altre società come la svedese Northvolt, la tedesca TerraE e la bulgara Monbat hanno nei loro piani lo sviluppo di Gigafactory europee. Per colmare lo svantaggio industriale esistente tra i produttori dell'est asiatico e quelli europei, in Europa si punta a prodotti innovativi e alleanze strategiche. La Saft ha annunciato un'alleanza con altri partner europei per la ricerca, lo sviluppo e l'industrializzazione di batterie di nuova generazione incentrate sulla tecnologia avanzata agli ioni di litio allo stato solido ad alta densità. Il programma si rivolge a tutti i segmenti di mercato, come l'elettromobilità (nei veicoli commerciali, ferroviario, marittimo e aeronautico), lo stoccaggio di energia e le industrie speciali. La Commissione Europea ha recentemente lanciato l'iniziativa "European Battery Alliance" per creare una produzione europea di batterie Li-ione e per interrompere la dipendenza dai fornitori asiatici. Il piano prevede una "batteria verde" che rispetti gli standard europei che includono anche il riciclaggio e gli scenari di seconda vita per le batterie e l'approvvigionamento responsabile. L'unica realtà industriale attiva nel campo delle batterie al litio presente sul territorio risulta essere la Lithops, società del Gruppo Seri Industrial. I suoi piani di sviluppo prevedono la realizzazione del primo impianto italiano per la produzione di celle a ioni di litio per applicazioni storage e trazione. Nell'ambito di questo progetto è stato acquistato il complesso ex Indesit di Teverola (CE), dove si intende realizzare lo stabilimento per la produzione delle celle al litio. L'investimento complessivo agevolabile ammonta a € 55,4 milioni, con un sostegno da parte del MiSE e della Regione Campania di circa € 37,4 milioni, in parte da erogare tramite contributi in conto capitale ed in parte tramite finanziamenti agevolati. Lo stabilimento per la produzione delle celle al litio avrà una capacità produttiva di almeno 200MW eventualmente potenziabile fino a 600MW.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

Le curve di apprendimento possono essere sfruttate per stimare lo sforzo finanziario cumulativo richiesto per stabilire un determinato volume di produzione delle batterie Li-ione. Utilizzando un singolo set di dati storici dei prezzi di produzione delle batterie per la trazione in funzione della capacità installata cumulativa, il bilancio complessivo richiesto per l'utilizzo di 300 GWh di batterie globalmente entro il 2025 è stimato a 32 miliardi di euro. Supponendo che non vi sia alcun cambiamento nel tasso di apprendimento, la maggior domanda globale di 1,3 TWh prevista entro il 2030 richiederebbe circa 66 miliardi di euro. I costi di investimento specifici per le nuove capacità di produzione di batterie al litio sono attualmente diminuiti a circa $ 150 / kWh e diminuiranno ulteriormente con l'ingresso di capacità produttive aggiuntive. I costi specifici di investimento riferiti alle Gigafactory pianificate e/o annunciate potrebbero scendere fino a 67 €/kWh (per capacità produttive di circa 150 GWh/anno).

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 5

TECNOLOGIE ACCUMULO CHIMICO – POWER TO GAS

Negli scenari delineati dall'Energy Roadmap 2050 della Commissione Europea la quota di energia da rinnovabili aumenta notevolmente per attestarsi come minimo al 55% del consumo finale lordo di energia nel 2050. È quindi richiesto a lungo termine un adattamento dei sistemi energetici esistenti, in modo che la generazione delle risorse rinnovabili possa essere coordinata con la domanda di energia elettrica, la disponibilità della rete esistente e le capacità di immagazzinamento. Tre sono i principali obiettivi enunciati che la politica energetica europea si prefigge di raggiungere: la sostenibilità del mercato energetico, la sua competitività e la sicurezza dell'approvvigionamento; il tutto comunque inquadrato nell'ottica di ridurre le emissioni di gas serra dall'80% al 90% rispetto ai livelli del 1990.

Già da tempo la tabella di marcia della Commissione Europea per il 2020 ha posto come target il raggiungimento del 20% di energia rinnovabile nel mix energetico complessivo dell'Unione. Anche negli obiettivi dichiarati UE per il 2030, le energie rinnovabili continueranno a svolgere un ruolo chiave per soddisfare il fabbisogno energetico interno con almeno il 27% del consumo finale di energia dell'UE nel suo complesso ricoperto dalla produzione da rinnovabili. In quest'ambito, le fonti di energia rinnovabile, come il solare o l'eolico, avranno un ruolo importante nella transizione del sistema energetico europeo.

Il raggiungimento di questi obiettivi implica la necessità di adottare soluzioni tecnologiche che consentano di adeguarsi ad un sistema elettrico sempre più caratterizzato da una forte variabilità dell'offerta dovuta alla presenza di fonti rinnovabili. Tali fonti, in particolare eolico e solare, essendo caratterizzate dalla peculiarità di essere non programmabili nel tempo, possono dar luogo a periodi di surplus di produzione elettrica (con parte dell'energia che non viene utilizzata) e a periodi di deficit di produzione con una parte della domanda che rimane inevasa (con parte dell'utenza che rimane non alimentata).

I sistemi di accumulo o storage possono in tale ambito rappresentare parte della soluzione. Essi possono immagazzinare il surplus di energia elettrica, qualora la rete di trasmissione non risulti idonea a smaltire in sicurezza tutta la potenza generata dalle fonti rinnovabili non programmabili, per poi rilasciarla in periodi di maggiore domanda, riequilibrando le curve di domanda e offerta.

Nell'ambito delle tecnologie di energy storage, il Power to Gas (PTG) prevede la conversione del surplus di energia elettrica in idrogeno o metano, consentendo uno stoccaggio di tipo chimico operando una trasformazione del vettore energetico. Una possibilità è quella di utilizzare l'energia elettrica in eccesso per alimentare un elettrolizzatore per produrre dall'acqua idrogeno che può essere stoccato e/o utilizzato in utenze di diverso tipo. Un'altra possibilità è quella di proseguire nel processo e far reagire l'idrogeno prodotto con un gas ad elevata concentrazione di CO_2 (e/o

CO) mediante la reazione di metanazione, per dar luogo alla produzione di gas naturale sintetico (SNG), che può essere a sua volta stoccato e/o utilizzato in vario modo.

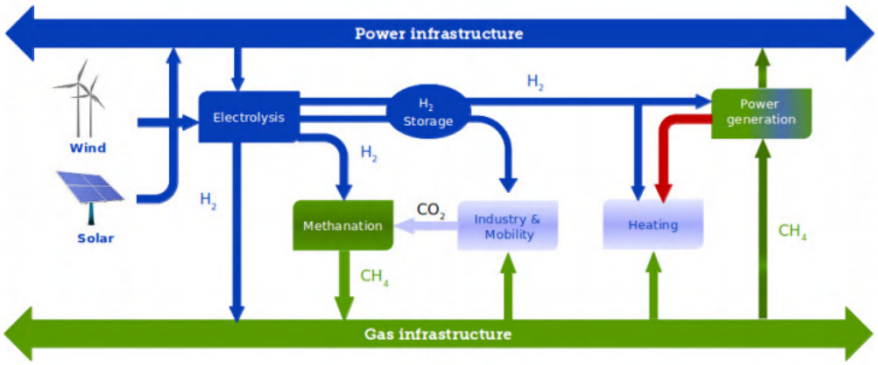


FIG. 1 SCHEMA SEMPLIFICATO DEL PROCESSO POWER TO GAS

Il processo di accumulo chimico è composto da più fasi. A queste corrispondono diverse tecnologie e prodotti con differenti mercati di destinazione e differenti utilizzatori finali (usi termici, mobilità, iniezione in rete). I singoli componenti di un impianto risultano in generale caratterizzati da una maturità tecnologica di tipo commerciale (essendo tecnologie ampiamente diffuse in ambito industriale). Non si può dire la stessa cosa per l'assieme che costituisce l'applicazione Power to Gas a causa della forte variabilità temporale della disponibilità dell'energia elettrica di alimento. È, infatti, essenziale che ciascuno di questi componenti (elettrolizzatori, buffer, reattori di metanazione) possa operare in condizioni di forte dinamicità con una ridotta diminuzione delle efficienze. Questo richiede degli adeguamenti della tecnologia, che può essere considerata ad un livello tecnologico pari a TRL 5-6 o, a seconda della tipologia di tecnologia, anche ad un livello inferiore (ad esempio celle elettrolitiche ad ossidi solidi (SOEC) per la produzione di idrogeno). Tra i vari componenti della filiera, la generazione di idrogeno risulta di certo la componente con maggiori aspetti da indagare, in particolare nel suo funzionamento in dinamico.

Le tecnologie più utilizzate per l'elettrolisi sono quella alcalina e quella PEM (Polymer electrolyte membrane). Entrambe operano a temperature minori di 80°C e pressioni dell'ordine dei 25 bar con efficienze dell'ordine del 60%. La direzione dello sviluppo prevede migliorate efficienze e pressioni operative. Nel caso poi si operi ad alta temperatura, è possibile utilizzare in parte anche energia termica in alimento (SOEC).

La metanazione chimica, conosciuta a partire dai primi del '900, è una tecnologia matura e commercialmente disponibile. I reattori operano tipicamente a temperature comprese nel range 200-550°C e a pressioni fino a 30 bar. La reazione richiede catalizzatori a base di nichel, cobalto, rutenio e rodio, supportati principalmente da ossidi.

Un'ulteriore possibilità è data dall'utilizzo del processo biologico. Nella metanazione biologica, microorganismi di tipo Archea sintetizzano il metano. Il processo avviene in soluzione acquosa

a temperature comprese tra 40°C e 70°C. I reattori più comunemente impiegati sono del tipo a miscelamento. In questa tipologia di processo, la fase limitante è il trasferimento dei gas reagenti nella fase liquida; pertanto generalmente il processo avviene a pressioni maggiori di quell'atmosferica. Attualmente lo stato di sviluppo della metanazione biologica è a livello di laboratorio, anche se esiste però qualche applicazione in impianti dimostrativi (BioCat – Elettroachea, taglia 1 MWe).

Le rese del processo, in termini di contenuto energetico del prodotto, sono dell'ordine del 60-70%, nel caso ci si fermi alla produzione di idrogeno elettrolitico e arrivano al 45-50%, nel caso si arrivi fino alla produzione di metano di sintesi.

Generalmente l'efficienza dei sistemi Power to Gas con produzione di SNG aumenta quando è utilizzato anche il calore rilasciato, per esempio in cicli di processo di tipo industriale, in impianti di teleriscaldamento o in impianti integrati con la tecnologia di cattura della CO_2 (ad esempio per la rigenerazione delle ammine).

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Il gas naturale sintetico presenta il vantaggio di poter essere adoperato in utenze che già utilizzano gas naturale con tecnologie e mezzi ampiamente disponibili sul mercato (caldaie, bruciatori, veicoli) e si caratterizza inoltre per la possibilità di essere immesso in rete nelle esistenti infrastrutture di trasporto e stoccaggio, senza la necessità di ulteriori investimenti. Di contro, la produzione di gas naturale sintetico prevede la presenza di una fonte di CO_2 che vincola la localizzazione degli impianti in siti ove questa è disponibile. Si tratta nella fattispecie di ambiti industriali "carbon intensive" come acciaierie, cementifici, raffinerie e impianti di estrazione di gas o, su scala più piccola, impianti a biogas.

Il Power-to-Gas è un'opzione promettente per l'iniezione e l'uso di gas da fonti rinnovabili. L'integrazione dei processi che compongono la filiera consente una discreta efficienza energetica. I costi di generazione non sono competitivi con quelli dei prodotti omologhi da fonte fossile, anche se i progressi nelle tecnologie di produzione di H_2 da elettrolisi potrebbero in futuro avere un potenziale rilevante per la riduzione dei costi. Ulteriori esperienze devono essere sviluppate in impianti dimostrativi su scala pilota.

Il settore dei trasporti potrebbe essere il principale driver anche in Italia a valle del Decreto Biometano (D.M. 2 marzo 2018 "Promozione dell'uso del biometano e degli altri biocarburanti avanzati nel settore dei trasporti"), applicando la tecnologia come upgrading del biogas a biometano.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Anche se il primo impianto è stato realizzato in Giappone dal Tohoku Institute of Technology nel 2003, attualmente la leadership tecnologica è europea con in testa paesi come la Germania, la Francia, la Svizzera e la Danimarca. Negli ultimi due anni, grazie anche al forte supporto di fondi governativi, oltre che di quelli comunitari, sono stati realizzati diversi impianti partendo dalla scala laboratorio di pochi kW fino a quella dimostrativa (dell'ordine dei MWe, 3x2.0 MW Audigas). Anche gli USA sono attivi nel settore con almeno quattro impianti realizzati dal 2009.

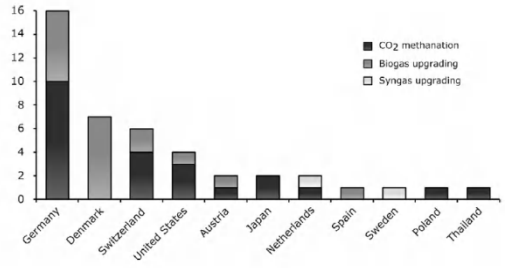


FIG. 2 PROGETTI P2G DISTRIBUITI PER PAESE E TECNOLOGIA
Fonte: Renewable and Sustainable Energy Reviews 69 (2017) 292–312

Attualmente sono in esercizio in Europa più di 20 impianti, con scale variabili da pochi kW a qualche MW. Tutti questi presentano differenti applicazioni di servizio specificamente orientate a soddisfare esigenze di mercato diverse. Solo due impianti, entrambi tedeschi, immettono il prodotto nella rete del gas naturale (l'impianto di Falkenhagen idrogeno e quello di Werlte metano). Gli altri impianti alimentano stazioni di rifornimento o effettuano stoccaggio e riconversione a livello locale (in sistemi integrati costituiti da serbatoi e fuel cell). Di fatto la tecnologia, attualmente ancora in fase di sviluppo con un numero ancora limitato di impianti realizzati, presenta tuttora basse efficienze e costi molto elevati rispetto agli omologhi prodotti da fonte fossile. Vi è però in generale un crescente interesse con studi che analizzano la diffusione della tecnologia e l'impatto sul mercato del gas (ad esempio lo studio commissionato a Ecofys dall'iniziativa Gas for Climate) e studi di varia natura che hanno l'obiettivo di superare le barriere tecniche, normative ed economiche.

Tra le attività ed i progetti in corso possono essere citati:

INGRID: progetto europeo FP7 che ha avuto come obiettivo principale quello di progettare e realizzare in Puglia un impianto innovativo da 39 MWh per lo stoccaggio di idrogeno e la distribuzione di energia attraverso la rete elettrica locale, che utilizza tecnologia di elettrolisi e storage dell'idrogeno, combinata con sistemi di alimentazione a celle di combustibile. Tra i partner: ENEL, McPhy e Hydrogenics.

ETOGAS–Audi e-gas plant: si tratta del più grande impianto industriale Power-to-Gas costruito al mondo (6 MW). È in funzione dal 2013 ed è situato a Werlte (Germania). Si basa sulla reazione catalitica di idrogeno puro e anidride carbonica in un singolo reattore isotermico a letto fisso. L'idrogeno proviene da 3 elettrolizzatori alcalini alimentati da un parco eolico off-shore sito nel Mare del Nord, che comprende 4 turbine da 3,6 MW. L'impianto, co-finanziato da Audi AG e da una compagnia elettrica regionale, è alimentato dalla CO_2 separata mediante lavaggio con ammina dal biogas grezzo prodotto in un vicino impianto appartenente a EWE Biogas GmbH & Co.

Jupiter 1000: è un progetto francese di dimostrazione industriale della tecnologia Power-to-Gas che ha l'obiettivo di identificare le problematiche di natura tecnica ed economica della tecnologia, nonché di analizzare i problemi normativi per quelli che saranno i futuri standard di produzione e di immissione nella rete gas. L'elettricità in eccesso presente nella rete sarà convertita in

idrogeno da due elettrolizzatori (alcalino e PEM) e successivamente in metano, utilizzando la CO_2 catturata da un processo industriale limitrofo. La taglia è 1 MWe con una produzione di circa 100 Nm3/h di H2 e 25 Nm3/h di CH4. Il progetto Jupiter 1000, costato 30 M€, è stato cofinanziato dall'Unione Europea nell'ambito dei fondi europei di sviluppo regionale, dallo Stato attraverso l'Agenzia Francese dell'Energia (Ademe) e dalla Regione Provenza-Alpi-Costa Azzurra e vede GRTgaz come capofila. Nel progetto è presente SNAM, attraverso la sua partecipata francese Tigf.

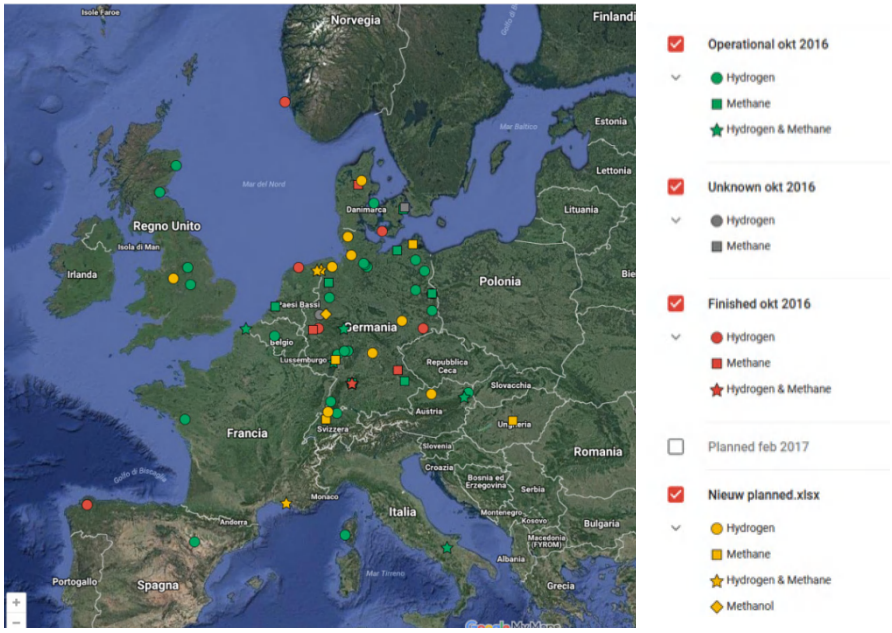


FIG. 3 DISTRIBUZIONE DEI PROGETTI P2G DISTRIBUITI PER PAESE
Fonte: www.europeanpowertogas.com/demonstrations

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

Nel contesto italiano l'applicazione di queste tecnologie avrebbe un'importante positiva ricaduta in termini strategici sia economici che ambientali con la diversificazione del mix energetico e l'estensione del portafoglio tecnologico dell'industria italiana.

Il conseguente impatto si allarga a tutta la filiera con miglioramento del posizionamento sul mercato degli operatori del settore, miglioramento delle efficienze di funzionamento del sistema energetico (elettricità e gas), fino alla riduzione dei costi per i consumatori finali.

La realizzazione di una piattaforma nazionale per lo sviluppo delle tecnologie PtG, nella prospettiva di tre anni, darebbe un contributo significativo allo sviluppo del settore dell'impiantistica industriale, diversificando il paniere delle fonti di approvvigionamento energetico nazionale nella direzione di una migliorata stabilità energetica.

Le risorse economiche necessarie sono pari a 3-4 MEuro per la realizzazione di un impianto pi-

lota con una taglia di riferimento pari a 100 kWe e 5 Nm3/h di SNG prodotto e immesso in rete. Si tratta della realizzazione di un'infrastruttura nella quale vanno a convergere sinergicamente le attività, gli sforzi e gli interessi della ricerca pubblica e dell'industria italiana in un'azione concreta volta a favorire la ricerca industriale e il trasferimento tecnologico. La realizzazione di impianti con scala del MWe richiede investimenti e partnership pubblico-private.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 6

SISTEMI DI ACCUMULO TERMICO

Lo sviluppo di materiali e apparecchiature per un efficiente stoccaggio dell'energia termica (acronimo TES dall'inglese Thermal Energy Storage) può rappresentare un valido aiuto nel processo di differenziazione delle fonti energetiche e delle tecnologie per il loro utilizzo. In particolare, il TES può essere di aiuto nell'utilizzo dell'energia termica che è quella che più facilmente viene dispersa in maniera irreversibile e dunque sprecata. Inoltre potrebbe essere di aiuto nei casi (frequenti) di discontinuità temporale tra la produzione di energia e il suo utilizzo. In termini di principi di base, i processi di accumulo e rilascio di energia termica sono essenzialmente flussi entalpici che si possono catalogare in base a tre concetti fondamentali: (i) la capacità termica di un materiale; (ii) il calore latente associato ad una transizione di fase; (iii) l'entalpia associata a reazioni chimiche. Le possibili tecnologie per l'accumulo dell'energia termica (Thermal Energy Storage TES) raccolta possono, quindi, ricadere in una delle seguenti categorie: (i) stoccaggio del calore sensibile, (Sensible Heat Storage SHS), (ii) stoccaggio del calore latente (Latent Heat Storage LHS), (iii) stoccaggio termochimico (Thermo-chemical Storage (TCS).

Stoccaggio del calore sensibile

La prima categoria (SHS) include i processi che utilizzano materiali ad elevata capacità termica (e.g. acqua, sali fusi, oli diatermici o materiali ceramici) che hanno come obiettivo il riscaldamento del mezzo di accumulo fino alla temperatura di carica. I mezzi di accumulo possono essere in fase liquida, solida o una combinazione di queste. Per alte temperature (>600 °C) sono da scegliere i mezzi solidi, grazie alla loro maggiore stabilità termica. Tra questi materiali quelli più studiati sono: acciaio, calcestruzzo, ghisa, sabbia, ossidi (e.g. di alluminio, magnesio).

Stoccaggio del calore latente

Le tecnologie LHS che usano materiali a cambiamento di fase PCM (Phase Change Materials) consentono maggiori densità di energia stoccata, rispetto alle tecnologie SHS, riducendo quindi il volume dei relativi moduli per l'immagazzinamento dell'energia. Le transizioni di fase liquido-vapore e solido-vapore appaiono meno interessanti da sviluppare perché coinvolgono grandi variazioni di volume quando il materiale passa allo stato gassoso, cosa che confligge con la necessità applicativa di avere moduli per l'immagazzinamento energetico di dimensioni contenute. Esistono anche transizioni solido-solido (ad esempio cambio di struttura cristallina) che però spesso presentano bassi valori di calore latente e una non completa reversibilità. Di fatto la transizione di fase nettamente più interessante per quest'applicazione è quella solido-liquido. Dal punto di vista concettuale, per massimizzare l'efficienza di recupero energetico, la transizione dovrebbe avvenire alla temperatura più elevata possibile. Questo è ben noto dal secondo principio della termodinamica, in particolare dalla sua applicazione al ciclo termico di Carnot. Un materiale PCM ideale dovrebbe

avere, oltre ad un'elevata temperatura di transizione, molte altre caratteristiche:

- temperatura di fusione (cristallizzazione) compatibile con l'applicazione;
- elevato calore latente per unità di massa e volume;
- contenuta variazione di volume nelle transizioni di fase;
- cristallizzazione riproducibile e reversibile senza smiscelazione;
- buona stabilità termica e resistenza alla degradazione;
- elevata conducibilità termica;
- non presentare problemi di corrosività per l'apparecchiatura o di impatto ambientale;
- essere facilmente disponibile a prezzi economicamente sostenibili.

Evidentemente non esiste un materiale "perfetto" che riesce a soddisfare tutti questi requisiti contemporaneamente. I metalli e alcuni sali inorganici (eventualmente in forma di idrati) hanno il vantaggio di temperature di transizione elevate ma mostrano forti limitazioni dovute ad altri problemi. I materiali metallici, ad esempio, hanno una densità troppo elevata e un basso calore latente di fusione per unità di peso. I sali inorganici invece sono critici perché portano a fenomeni di corrosione e per la parziale irreversibilità dei cicli di transizione solido-liquido. Pertanto tra le varie strade che si stanno esplorando a livello di ricerca ha preso corpo anche quella dei composti organici. Questi hanno un "handicap" di base dovuto alla bassa temperatura di transizione solido-liquido (quasi sempre inferiore ai 200 °C e spesso anche ai 100 °C) che però può essere compensato, in alcuni tipi di applicazioni, da loro altre caratteristiche. Verranno descritte le motivazioni e gli sviluppi relativi ai materiali organici, con particolare riferimento al caso dei materiali polimerici.

Stoccaggio termochimico

Con il termine di 'stoccaggio termochimico' s'intende una famiglia di processi chimico-fisici atti a stoccare l'energia attraverso l'impiego di una coppia reversibile di reazioni chimiche (endotermica in fase di carica ed esotermica in fase di rilascio del calore), in generale, espressa come $A + \Delta H_r \leftrightarrow B+C$. Con il termine A si indica, in generale un reagente che si dissocia in due componenti B e C. Da tale famiglia sono esclusi i processi elettrochimici (e.g. batterie) ed i processi elettromagnetici (e.g. fotosintesi). Nel momento in cui è richiesta energia, ad esempio nelle ore notturne, i prodotti sono fatti reagire adeguatamente in un reattore attraverso una reazione esotermica restituendo l'energia necessaria per la produzione, ad esempio, di vapore da espandere in turbina. Questo tipo di tecnologia si basa, quindi, su un processo di carica e scarica di energia termica, rispettivamente, attraverso la rottura e la successiva formazione di legami chimici. Il materiale ideale per essere utilizzato come mezzo di accumulo deve presentare, quindi, un'elevata energia di legame per ottimizzare la capacità d'immagazzinamento. Per rendere più efficiente lo stoccaggio di calore, la coppia di reazioni endotermica-esotermica deve essere completamente reversibile e deve avvenire in assenza di reazioni parassite che ne riducono la capacità di stoccaggio. Il materiale ideale inoltre dovrebbe mostrare un elevato grado di stabilità chimica durante i diversi cicli di carica e scarica massimizzandone quindi il suo utilizzo. I principali materiali termochimici (Termo-chemical materials TCMs) presi in considerazione sono i carbonati, gli idrossi-

di, gli idruri metallici e i sali di ammonio. I processi termochimici possono generalmente dividersi a loro volta in processi ad absorbimento liquido, adsorbimento solido e reazioni chimiche che avvengono in assenza di un processo di assorbimento (e.g. reazione gas-gas). Di seguito alcuni esempi di stoccaggio termochimico a media ed alta temperatura (250-1100 °C) idonei per lo stoccaggio dell'energia solare e di eventuali cascami termici prodotti in siti industriali (acciaierie, cementifici). Sistemi ad idruri metallici – La reazione in forma generale per lo stoccaggio termochimico è $MH_n + \Delta Hr \leftrightarrow M+n/2\ H_2$ dove M rappresenta un metallo e l'entalpia di reazione è di circa 75 kJ/mol. L'idruro utilizzato per lo stoccaggio termochimico è generalmente quello di magnesio (MgH_2), l'intervallo di temperatura è generalmente 250-500 °C. *Sistemi ad idrossidi* – La reazione in forma generale per questo tipo di stoccaggio è $M(OH)_{2(s)} + \Delta H_r \leftrightarrow MO_{(s)} + H_2O_{(g)}$. Generalmente i metalli utilizzati sono calcio e magnesio, l'intervallo di temperatura è di circa 250-450°C. Per il magnesio l'entalpia di reazione è 81 kJ/mol mentre per il calcio è pari a 104 kJ/mol. *Sistemi redox* – La reazione in forma generale è $M_xO_y + \Delta H_r \leftrightarrow xM+y/2\ O_2$ dove M rappresenta un metallo. I metalli generalmente utilizzati sono cobalto e bario e l'intervallo di temperatura 400-1030°C. Per il bario l'entalpia di reazione è 77 kJ/mol mentre per il cobalto è 205 kJ/mol. *Sistemi ad ammoniaca* – Generalmente tali sistemi si raggruppano in sistemi liquidi definiti dalla reazione $NH_4HSO_{4(l)} + \Delta H_r \leftrightarrow NH_{3(g)} + H_2O_{(g)} + SO_{3(g)}$ e in sistemi gassosi definiti dalla reazione $2NH3(g) + \Delta H_r \leftrightarrow N_{2(g)} + 3H_{2(g)}$ che hanno rispettivamente un'entalpia di reazione di 336 kJ/mol e 66,9 kJ/mol. I sistemi ad ammoniaca hanno un intervallo di temperatura tra 430 °C e 930 °C. *Sistemi organici* – In questi sistemi sono annoverati i noti processi di reforming del metano con vapor d'acqua (SMR, *Steam Methane Reforming*) e CO_2 (DMR, *Dry Methane Reforming*). *Sistemi a carbonati* – Tali sistemi sono caratterizzati dalla reazione $MCO_{3(s)} + \Delta H_r \leftrightarrow MO(s) + CO_{2(g)}$ dove M rappresenta un metallo. Generalmente i metalli presi in considerazione per l'accumulo di energia sono calcio e piombo. Per i sistemi a carbonato di calcio ($CaCO_3$) l'intervallo di temperatura operativo è tra i 700 e 1000 °C e mostra un'entalpia di reazione di 178 kJ/mol.

MOTIVAZIONE PER LO SVILUPPO

L'energia solare termica a concentrazione (CSP *Concentration Solar Power*) è una tecnologia che consente di produrre e distribuire energia con un bassissimo impatto ambientale, utilizzando sorgenti rinnovabili e senza emissioni. La potenza totale installata su scala mondiale a fine 2016 ammontava a 456 GW termici con una produzione annua complessiva di 375 TWh (*rif. Weiss W, Spörk-Dür M, Mauthner F. Solar Heat Worldwide. AEE - Institute for Sustainable Technologies, IEA Solar Heating & Cooling Programme, May 2017*). Questa capacità produttiva comporta un risparmio di 130 milioni di tonnellate di CO_2, corrispondente circa allo 0,35% sul totale delle emissioni annue di CO_2 dovute all'utilizzo di combustili fossili[13]. Tuttavia, come di frequente accade nelle energie rinnovabili, questa tecnologia presenta difficoltà di applicazione a causa della discontinuità della fonte energetica stessa e dello sfasamento temporale che spesso si ha tra la produzione energetica e il suo consumo. In questo contesto lo stoccaggio dell'energia termica (TES Thermal

13 https://www.carbonbrief.org/analysis-global-CO2-emissions-set-to-rise-2-percent-in-2017-following-three-year-plateau

Energy Storage) assume una crescente importanza nell'assicurare efficienza ambientale ed economica a questo tipo di tecnologia mediante due distinte fasi di processo. La prima di esse è quella in cui l'energia, durante la fase di produzione, viene caricata nel sistema di stoccaggio. Nella seconda fase l'energia è rilasciata, quando si rende necessario il suo utilizzo perché la produzione di energia non è sufficiente rispetto alla richiesta. Risulta così chiaro che un efficiente sistema di stoccaggio dell'energia termica (TES) può essere di grande aiuto nell'utilizzo ottimale dell'energia solare CSP.

Le elevate temperature a cui viene raccolta l'energia, attraverso moduli CSP, fanno delle tecnologie di accumulo termochimico una delle tecnologie più promettenti per lo stoccaggio di energia solare. Infatti, la possibilità di poter accumulare energia come potenziale termochimico, consente un'implementazione più efficiente della tecnologia, dato che non è necessario mantenere a temperatura elevata il sistema di accumulo. Invece il recupero di "calore di bassa qualità" (tipicamente a temperature comprese tra quella ambiente e i 200 °C) presenta problemi tecnici ed economici che in genere lo hanno reso di scarso interesse. Emblematica, al riguardo, l'espressione che si è consolidata nello slang tecnico che li definisce "cascami termici". Tuttavia alcuni esempi come lo stoccaggio-recupero di energia termica in impianti domestici rendono interessanti i sistemi TES che operano a temperature medio-basse.

A livello di abitazioni civili, infatti, è difficile ipotizzare l'utilizzo di impianti a temperature molto elevate, che hanno complessità tecnologiche tipiche di strutture industriali. Le temperature di lavoro medio-basse dei PCM sono potenzialmente applicabili anche per il recupero di cascami energetici in attività industriali.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Processi per l'accumulo del calore latente – Come già accennato, si sta sviluppando l'interesse per i materiali polimerici, in particolare per l'HDPE (High Density PolyEthylene) in quanto ha temperature di lavoro comprese tra i 90 e i 140 °C, ottima stabilità termica, riproducibilità della transizione e un'alta percentuale di fase cristallina che porta ad elevati valori di energia immagazzinata per unità di volume (da 300 a 340 MJ/m^3). Come per i materiali organici non di natura polimerica, anche l'HDPE ha il suo "tallone d'Achille" nel basso valore del coefficiente di conducibilità termica. Versalis (uno dei maggiori produttori europei di polimeri) sta sviluppando formulazioni di HDPE modificati con opportuni filler inorganici (che mostrano buona conducibilità termica) per trovare range compositivi che siano una sorta di compromesso virtuoso tra i pro e i contro dei due tipi di materiali.

Un esempio è riassunto nella tabella sottostante. Il polimero HDPE di base è stato modificato con varie percentuali di due diversi filler inorganici. Come si vede facilmente dai dati ottenuti, il filler 1 è il più efficace per innalzare il livello della conducibilità termica, anche se ha lo svantaggio di essere molto più costoso del filler 2.

La tabella riporta vari esempi di formulazioni miste, contenenti i due diversi filler, che rappresentano soluzioni entro le quali è possibile trovare il desiderato rapporto costo/prestazioni. In particolare, si giudica incoraggiante l'aver ottenuto un valore di conducibilità termica tre-quattro volte superiore a quello dell'HDPE con il 20% in volume di filler (in peso circa 30%).

HDPE (VOL %)	FILLER 1 (VOL%)	FILLER 2 (VOL%)	CONDUCIBILITÀ TERMICA [W / (M·°K)]
100	0	0	0,46
95	5	0	0,99
80	20	0	1,80
80	0	20	0,98
85	5	10	1,25
80	5	15	1,47
80	10	10	1,52

TABELLA 1: VALORI DELLA CONDUCIBILITÀ TERMICA DI HDPE TAL QUALE E MODIFICATO CON DIVERSI CONTENUTI DI DUE FILLER INORGANICI DIVERSI.

Tra i prossimi obiettivi si cercherà di sviluppare un prototipo (su scala industriale dimostrativa) di un sistema in grado di immagazzinare e rilasciare il calore per aumentare l'efficienza del solare termico a concentrazione. Il sistema sarà progettato per essere installato presso utenze domestiche (appartamenti singoli o gruppi) e fornire ad esse il servizio di condizionamento degli ambienti e la fornitura di acqua per uso civile-sanitario.

Processi per l'accumulo termochimico - Tra i processi termochimici particolare attenzione stanno avendo i sistemi a carbonati di calcio (calcite) e magnesio (dolomite), nota come tecnologia CaL (Calcium Looping o Carbonate Looping). Questo interesse è dovuto essenzialmente all'elevata entalpia di reazione se confrontata con gli altri sistemi, unito all'utilizzo di un materiale a basso costo (calcite e/o dolomite <10 €/t), l'assenza di tossicità per l'uomo e l'ambiente in raffronto ad esempio con i sistemi a piombo o a cicloesano. Dopo la fase di accumulo energetico (carica), che avviene in un calcinatore ad una temperatura di circa 900 °C, i materiali prodotti (i.e. CaO, CO_2) vengono stoccati separatamente a temperatura ambiente per poter ridurre le perdite di calore. La fase di scarica avviene subito dopo le ore diurne o in presenza di oscillazione dell'energia captata durante il periodo diurno.

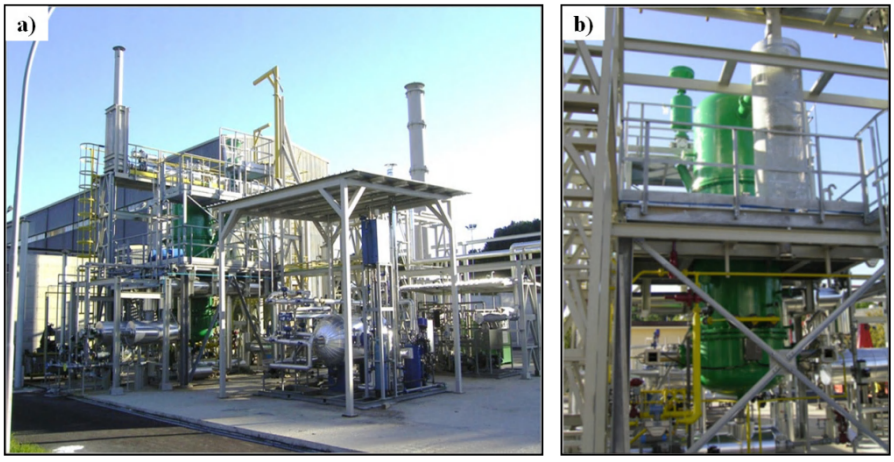


FIGURA 1. VISTA GENERALE DELL'INFRASTRUTTURA DI RICERCA ZECOMIX; (B) MODULO CAL A LETTO FLUIDO PER

LO STOCCAGGIO ED IL RILASCIO DI ENERGIA TERMICA

La reazione tra CO_2 e CaO avviene all'interno di un letto fluido che consente un contatto intimo tra i due componenti e permette di controllare la temperatura di rilascio del calore di reazione. Il rilascio di calore avviene ad una temperatura di circa 650 °C, ben superiore al limite di circa 550 °C che si ha nell'utilizzo di sistemi SHS (e.g. sali fusi), consentendo quindi un uso ancora più efficiente dell'energia solare in cicli termodinamici per la produzione di energia elettrica. Inoltre, l'assenza di perdite di calore durante lo stoccaggio di CaO e CO_2 rende la tecnologia CaL un'ottima candidata all'accumulo stagionale dell'energia solare.
ENEA da anni è a capo di un'infrastruttura di ricerca censita tra quelle delle ESFRI (European Science Foundation Research Infrastructure). Tra le principali sezioni dell'infrastruttura ZECOMIX (Zero Emissions of Carbon with Mixed technologies) (vedi Figura 1) vi è un'unità CaL a letto fluido in cui si usa dolomite granulare come materiale TCS.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

I costi economici, nell'arco dei prossimi cinque anni, sono stimati in circa 4 milioni per lo sviluppo di processi per l'accumulo termochimico e del calore latente. Di questi 3 milioni di euro per il costo del personale di R&D che si prevede di impegnare su questi materiali (i.e. PCM, TCM) e il restante per lo sviluppo, la realizzazione o l'up-grade di prototipi dimostrativi.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 7

SISTEMI DI GESTIONE PER L'ACCUMULO DI ENERGIA E MONITORAGGIO DELLA QUALITÀ DEL SERVIZIO ELETTRICO

L'evoluzione in atto delle reti elettriche a livello nazionale ed europeo richiede l'utilizzo di tecnologie innovative e sistemi di gestione sempre più efficienti che siano in grado di integrare i sistemi di generazione distribuita, mantenendo allo stesso tempo, la qualità del servizio elettrico. I crescenti livelli di penetrazione delle fonti rinnovabili, che sono, per loro natura, intermittenti e non programmabili, e della quota di generazione distribuita, richiedono una sostanziale modifica delle logiche di gestione dei flussi di energia scambiati in rete tra i sistemi di generazione e i carichi.
Attualmente, accanto alle attività di sviluppo orientate a rendere possibile l'invio energia elettrica da rinnovabili (PV ed eolico) al fine di migliorarne gli economics, sta crescendo l'interesse sul tema della fornitura dei servizi ancillari alla rete (inerzia rotante; regolazioni della frequenza; riserva energetica; livellamento potenza di generazione e carico; power quality) in sostituzione della generazione "convenzionale". Il processo di trasformazione del sistema elettrico si presenta quindi complesso, non interessando soltanto la parte infrastrutturale delle reti, ma anche i sistemi di gestione delle reti stesse, che, in un'ottica di smart grid, devono essere in grado di gestire e monitorare, con elevata flessibilità, le unità di generazione, trasmissione, distribuzione e gli usi finali dell'energia elettrica.
In tale contesto, i sistemi di accumulo di energia sono una tecnologia abilitante lo sviluppo delle reti elettriche, grazie alla loro capacità di operare in termini di scambio di energia e di potenza con la rete e di mitigare le problematiche associate ai crescenti livelli di penetrazione delle fonti rinnovabili non programmabili in rete a seguito dell'attuazione della Direttiva Comunitaria 2009/28/CE[14].
In dettaglio, numerosi sono i fattori che determinano la necessità di prevedere l'impiego di sistemi di accumulo nelle reti elettriche:

- Integrazione dei sistemi di generazione distribuita, soprattutto con riferimento ai sistemi di generazione da fonte rinnovabile;
- sviluppo ed implementazione di soluzioni che favoriscano un uso più efficiente dei sistemi di trasmissione e distribuzione esistenti, considerando, allo stesso tempo, i limiti delle infrastrutture attuali e le problematiche (tecniche, economiche, sociali in termini di accettabilità, etc.) legate alla realizzazione di nuovi sistemi;
- sviluppo di un sistema elettrico intelligente, che in un'ottica di smart grid, sia in grado di far interagire produttori e consumatori e quindi di adattare con flessibilità la produzione ed il consumo di energia, agendo localmente su scale ridotte;

14 Direttiva Comunitaria 2009/28/CE https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/ALL/?uri=CELEX%3A32009L0028

- sostituzione graduale della fornitura dei servizi ancillari, effettuata finora dalla generazione a combustibili fossili, con la generazione da rinnovabili.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

I benefici dei sistemi di accumulo interessano l'intera catena dell'approvvigionamento energetico, spaziando dalla generazione, trasmissione e distribuzione, fino ad arrivare all'utente finale. In dettaglio, si analizzano di seguito le principali aree di applicazione dei sistemi di accumulo, con le relative logiche di gestione, di maggiore interesse per la comunità scientifica internazionale e le industrie del settore e che necessitano di ulteriore investigazione nei prossimi anni (Figura 1):

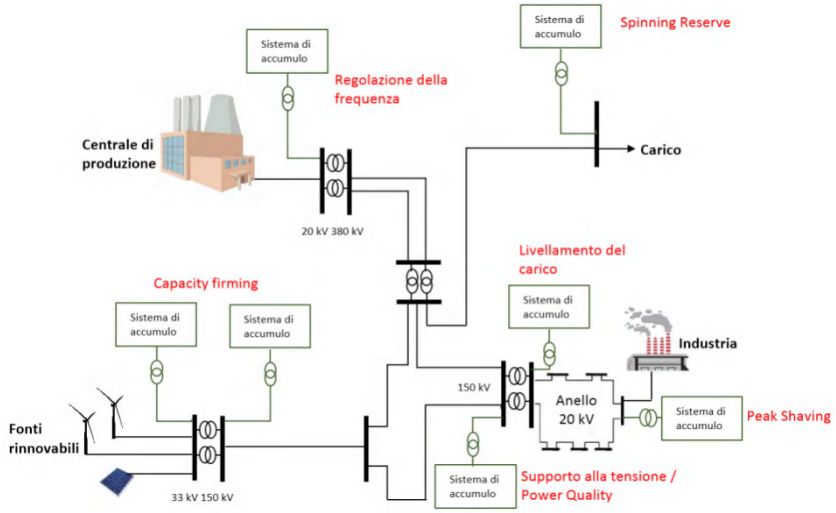


FIGURA 1. PRINCIPALI AREE DI APPLICAZIONE DEI SISTEMI DI ACCUMULO[15]

- Inerzia sintetica: l'inerzia rotante della rete elettrica interconnessa, data dal macchinario elettrico rotante, sia in generazione sia come carico, garantisce la stabilità della frequenza a fronte degli sbilanciamenti tra generazione e carico. La riduzione dell'inerzia rotante dovuta alla progressiva dismissione della generazione convenzionale fossile dovrà essere sostituita da analoga inerzia "sintetica" messa a disposizione da sistemi basati sull'accumulo energetico.
- Regolazione della frequenza: l'utilizzo dei sistemi di accumulo per la fornitura di servizi ancillari quali la regolazione della frequenza, è considerata un'applicazione promettente sia in termini economici - per la riduzione dei costi di Operation & Maintenance - sia in termini ambientali, grazie ad una riduzione significativa dell'impronta di carbonio rispetto alla generazione convenzionale. Per applicazioni legate alla regolazione della frequenza,

15 Immagine rielaborata da "Energy Storage: The benefits beyond the integration of renewables" ABB review 4/2015.

il sistema di accumulo viene caricato o scaricato in risposta, rispettivamente, ad un aumento o riduzione della frequenza di rete, a seguito di uno sbilanciamento improvviso tra generazione e domanda di energia.

- Riserva energetica in caso di guasto sulla linea (Spinning Reserve): affinché il sistema di accumulo possa essere utilizzato come riserva energetica in caso di guasto sulla linea (spinning reserve), è necessario che il relativo sistema di gestione lo mantenga ad un livello di carica tale da poter far fronte ad un'improvvisa interruzione di generazione per guasti in rete. Il sistema di accumulo è così in grado di rispondere, in piccolissime frazioni di secondo, per fornire la potenza necessaria al fine di preservare la continuità del servizio, mentre il generatore di back-up è messo in funzione.
- Livellamento del carico: il livellamento del carico comporta l'accumulo di energia nei periodi di basso carico e il successivo rilascio per far fronte a carichi di picco. In tali circostanze, il sistema di accumulo fornisce l'energia necessaria al soddisfacimento della domanda riducendo il carico di picco degli impianti di generazione, risultando, pertanto, una soluzione economicamente più vantaggiosa.
- Taglio dei picchi di carico (Peak shaving): il processo del taglio pei picchi di carico (peak shaving) è simile a quello di livellamento del carico. In entrambi i casi, infatti, il sistema di gestione dell'accumulo consente di immagazzinare energia quando la richiesta è bassa e di rilasciarla quando invece è alta. La differenza sostanziale sta nell'obiettivo primario dei due processi. Mentre mediante il livellamento del carico, l'intento è quello di livellare ed appiattire la curva di carico, nel peak shaving, l'obiettivo è di rimuovere i picchi, non agendo quindi in maniera diretta sull'economia del funzionamento del sistema di alimentazione. L'installazione che consente l'applicazione del peak shaving è spesso proprietà del consumatore finale, che ne trae beneficio mediante tariffe agevolate del tipo Time-of-Use.
- Correzione fattore di potenza e riduzione distorsioni tramite filtraggio armoniche (Power Quality): i sistemi di accumulo utilizzati per migliorare la qualità del servizio del sistema elettrico (Power Quality) sono dimensionati per proteggere i carichi da contingenze di breve durata che possono incidere sulla qualità della potenza trasmessa al carico, tra cui[16]:
- Variazioni in ampiezza della tensione di alimentazione;
- Variazioni della frequenza con riferimento al suo valore nominale;
- Riduzione del fattore di potenza del carico;
- Presenza di armoniche in rete;
- Interruzioni nell'alimentazione dei carichi;
- Ottimizzazione della generazione da sorgenti rinnovabili (Capacity firming): i sistemi di accumulo, con le opportune logiche di gestione, possono essere utilizzati per compensare la variabilità della potenza generata dalle fonti energetiche rinnovabili non programmabili, in modo da ottenere un profilo della potenza erogata quanto più possibile costante nel tempo.

16 M. Conte, G. Graditi, M.G. Ippolito, E. Riva Sanseverino, E. Telaretti, G. Zizzo "Analisi e definizione di strategie di gestione e controllo di sistemi di accumulo elettrico per applicazioni in reti di distribuzione attive automatizzate - Report 1 – Analisi dello stato dell'arte". Report RdS/2011/303.

In dettaglio, per far fronte alla variabilità tipica della produzione da rinnovabile, il sistema di accumulo può intervenire attenuandone la potenza erogata e controllando la velocità di rampa (MW/min), al fine di evitare rapide oscillazioni di tensione e potenza sulla rete.

Oltre alle applicazioni di natura puramente elettrica appena descritte, un'altra applicazione di particolare interesse riguarda l'integrazione dei sistemi di accumulo in reti caratterizzate dalla presenza di molteplici vettori energetici, quali ad esempio elettricità e calore. In tale contesto, il sistema di accumulo è in grado di fornire servizi aggiuntivi al sistema energetico integrato, fornendo maggiore flessibilità grazie alla possibilità di integrare diversi settori quali quello dell'elettricità, del riscaldamento e raffrescamento degli edifici e dei trasporti. Tali applicazioni includono[17]:

- Accumulo di energia su larga scala e/o a lungo termine (settimanale, mensile o stagionale) di energia elettrica da fonte rinnovabile, mediante l'impiego di sistemi di accumulo di energia termica.
- Recupero del calore di scarto proveniente da centrali elettriche e processi industriali mediante l'impiego dell'accumulo termico, che consente di disaccoppiare i processi di produzione e utilizzo, immagazzinando l'energia termica per un uso successivo.

Per rendere pratici i benefici derivanti dalle applicazioni menzionate finora, è necessario agire sul sistema di accumulo non come componente isolato da utilizzare per uno specifico bisogno locale, ma, al contrario, come parte integrante della rete. Di conseguenza, è necessario che le utility del settore guardino oltre l'aspetto locale, per assumere, al contrario, una visione strategica delle componenti fisiche e finanziarie dell'accumulo di energia. Il primo passo per il raggiungimento di tale obiettivo, dovrebbe essere lo sviluppo, da parte delle utility, di un piano di risorse a lungo termine, che sia indipendente dalla tecnologia specifica di accumulo. Ciò consentirebbe di identificare il modo migliore, non solo per dispacciare l'energia immagazzinata in base alle previsioni dei prezzi dell'energia, ma anche per fornire l'elettricità al minor costo possibile. I distributori, ad esempio, dovrebbero innanzitutto identificare i punti deboli della rete in cui l'eventuale sistema di accumulo potrebbe contribuire a migliorare l'affidabilità del servizio di distribuzione, per poi determinare il punto ottimale di connessione. È, pertanto, necessario che gli operatori prendano decisioni in base alle caratteristiche e prestazioni della loro rete, basandosi sull'analisi previsionale dei prezzi dell'energia elettrica e sull'utilizzo di tali prezzi per prevedere, a sua volta, sia la frequenza con cui funzioneranno i loro impianti di accumulo che il profitto derivante in un determinato periodo temporale. Tutti questi processi richiedono input aggiuntivi che coinvolgono previsioni (forecasting) metereologiche e di carico nonché una conoscenza approfondita della rete. Inoltre, in uno scenario di visione integrata delle reti, è necessario sviluppare sistemi di gestione ottimale, in termini tecnico-economici, di tutte le risorse di rete, quali fonti energetiche, unità di accumulo e carichi (implementando opportuni programmi di demand response). Mediante l'implementazione di questi aspetti chiave e tramite lo sviluppo di opportuni sistemi di gestione co-

17 "Joint EASE-EERA: Recommendations for a EUROPEAN ENERGY STORAGE TECHNOLOGY DEVELOPMENT ROADMAP TOWARDS 2030".

erenti con la specifica area di impiego, l'integrazione dei sistemi di accumulo, come componente attiva della rete nel sistema elettrico, può realmente garantire la transizione dell'attuale sistema energetico verso un modello sempre più basato sulla generazione distribuita e le reti energetiche integrate (elettricità e calore) mantenendo, al contempo, l'affidabilità e la qualità del servizio elettrico.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Secondo l'Energy Storage Report[18], nel 2016 la capacità totale di accumulo installata a livello globale è quantificata in oltre 170 GW così suddivisi:

- 60 GW in Asia;
- 45 GW in Europa con l'Italia nella lista delle top 10 Country a livello globale con circa 7 GW in totale;
- 21 GW negli USA;
- 44 GW distribuiti nel resto del mondo.

Oltre il 95% della capacità totale installata è caratterizzato da tecnologie di tipo meccanico e da pompaggi idroelettrici, mentre la restante parte consta di soluzioni tecnologiche di tipo chimico, elettrochimico, elettrico e termico. Tuttavia, in ambito europeo, la tecnologia elettrochimica delle batterie è quella caratterizzata da una maggiore dinamica di crescita e sviluppo. Con specifico riferimento ai costi, parallelamente alla riduzione del costo dell'energia prodotta da rinnovabili (PV ed eolico), si sta assistendo ad una altrettanto rapida riduzione del costo dei sistemi di accumulo di tipo elettrochimico. I CAPEX dell'accumulo elettrochimico con tecnologia agli ioni di litio sono scesi negli ultimi 9 anni da 1000 a 200 $/MWh di capacità installata.

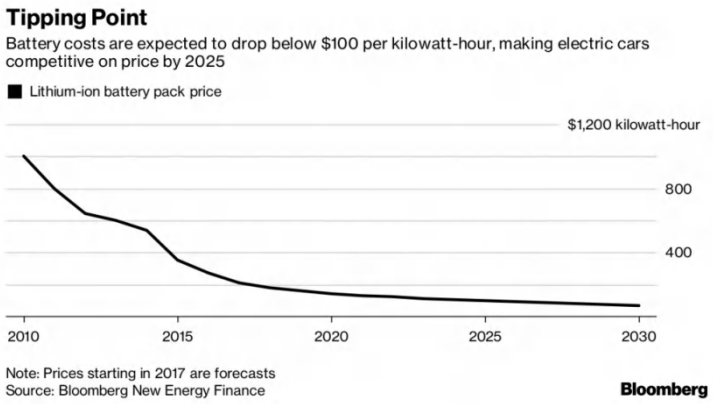


FIGURA 2. PROIEZIONI AL 2030 DEL CAPEX DEI SISTEMI DI ACCUMULO ELETTROCHIMICO CON TECNOLOGIA AGLI IONI DI LITIO19

18 "Energy Storage Report": Le applicazioni ed il potenziale di mercato delle soluzioni di storage in Italia: dall'accumulo di energia alla fornitura dei servizi di rete", Energy & Strategy Group, Novembre 2016.
19 Fonte Bloomberg 5/2018.

Come mostrato in Figura 2, alcune proiezioni al 2025 stimano che saranno raggiunti i 100 $/MWh e che il costo aggiuntivo di un adeguato sistema di accumulo, integrato direttamente alle rinnovabili PV o eolico potrebbe aumentarne il CAPEX complessivo in modo quasi trascurabile (circa il 5%). Sebbene attualmente il quadro regolatorio e legislativo sia italiano che europeo si stia adattando alle esigenze di rete, mediante l'apertura dei sistemi di accumulo al mercato, mancano, ad oggi, reali strumenti operativi e business models a servizio degli operatori, per la pianificazione e gestione ottimale della rete attiva in presenza di diverse risorse di flessibilità, quali rinnovabili, accumulo e domanda attiva degli utenti. In prospettiva futura, con riferimento al contesto italiano ed europeo, le aree di utilizzo più promettenti per i sistemi di accumulo di energia con i relativi sistemi di gestione, si possono così classificare:

- generazione: l'impiego di sistemi di accumulo in accoppiamento a impianti di generazione tradizionale consentirebbe di disaccoppiare parzialmente l'esercizio delle centrali dalle richieste della rete, consentendo di ridurre lo stress delle apparecchiature e di aumentare il fattore di utilizzazione delle centrali. Un'altra modalità promettente per aumentare la flessibilità degli impianti tradizionali, consiste nel rendere maggiormente programmabili gli impianti alimentati da fonti rinnovabili mediante l'accoppiamento con sistemi di accumulo, che, da un lato, possono ridurre gli sbilanciamenti rispetto alla previsione della produzione supportando così il gestore di rete nel contenere il ricorso al Mercato dei Servizi di Dispacciamento (MSD), e, dall'altro, possono fornire altri servizi ancillari alla rete.
- trasmissione: i gestori di reti di trasmissione in generale, e TERNA in particolare, hanno individuato nei sistemi di accumulo elettrochimico, uno strumento promettente per il potenziamento della rete stessa e per una sua gestione più efficiente. L'impiego di sistemi di accumulo, collocati nei nodi dei rami delle reti elettriche con forte presenza di rinnovabile, è considerato infatti una valida soluzione di breve/medio termine per ovviare a potenziamenti di rete, ben più onerosi per natura (Capital deferral).
- distribuzione: i sistemi di accumulo rappresentano una soluzione promettente anche per i distributori. I crescenti livelli di penetrazione di generazione distribuita non programmabile connessa alle reti di media e bassa tensione, spingono infatti i distributori a variare i criteri di pianificazione e gestione della rete nell'ottica di massimizzare la generazione distribuita, mantenendo al contempo la qualità e l'affidabilità del servizio.
- consumo: l'impiego di sistemi di accumulo sul lato consumo, consentirebbe una gestione più flessibile dell'impianto di produzione di proprietà dell'utente, abilitando lo stesso ad una partecipazione attiva alla gestione della rete a cui è connesso.

Ai fini dell'impiego effettivo dei sistemi di accumulo, la maggiore prospettiva di sviluppo riguarda proprio i sistemi di gestione del dispositivo di accumulo. È necessario, infatti, sviluppare ed implementare sistemi informatici per la gestione ottimale dell'accumulo volti a massimizzare i benefici degli operatori tramite erogazione di servizi ed applicazioni anche multiple[20].

20 L. Michi. "Ruolo e prospettive dello Storage nel Sistema Elettrico Italiano", Workshop TERNA Il ruolo dello storage nella gestione delle reti, Settembre 2017.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

In Italia, sono numerosi gli operatori di rete e i soggetti industriali interessati all'integrazione dei sistemi di accumulo in rete e allo sviluppo dei relativi sistemi di gestione ai fini del monitoraggio del servizio elettrico. Si stima che l'investimento necessario per una reale implementazione di questi sistemi al fine di ottenere un'effettiva integrazione dell'accumulo in rete sia dell'ordine di decine di milioni di euro nel prossimo triennio.

3. TECNOLOGIE PRO VETTORI ENERGETICI

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 8
BIO- FEEDSTOCK DI 2A E 3A GENERAZIONE

Come noto, le preoccupazioni legate ai biocarburanti di prima generazione in termini di sostenibilità ambientale e di competizione con usi alimentari dei feedstock da cui essi erano prodotti, quali le colture oleaginose, cerealicole, amidacee e zuccherine, hanno suscitato notevole interesse su biocarburanti di 2a e di 3a generazione.

Questi dovrebbero risolvere, almeno parzialmente, i problemi legati ai biocarburanti di prima generazione dal momento che sono prodotti a partire da feedstock quali residui agricoli e forestali, colture lignocellulosiche dedicate all'uso energetico e la frazione organica dei rifiuti urbani.

In tal modo verrebbero garantiti i target di riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra senza che vi siano quegli effetti negativi che sono stati associati ai biocarburanti di prima generazione.

Questo interesse si sta traducendo sempre di più in nuove iniziative sia a livello di ricerca che industriale anche su larga scala.

L'Italia è sicuramente uno dei paesi in prima linea in questo sviluppo con la realizzazione del primo impianto full scale per etanolo di seconda generazione e alla riconversione di raffinerie tradizionali in bioraffienerie da parte di Eni.

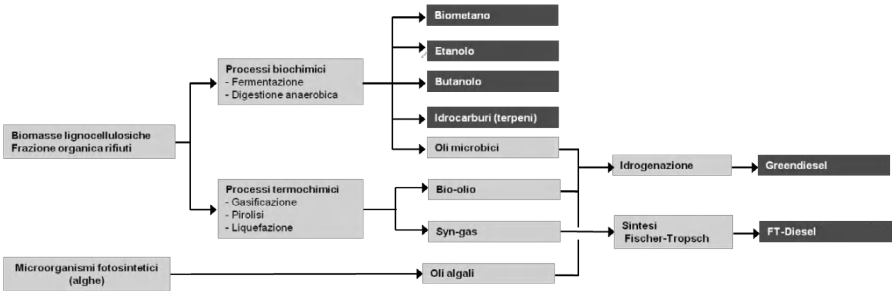
Le politiche della UE nei settori dell'energia e del cambiamento climatico rappresentano un ulteriore stimolo allo sviluppo dei combustibili alternativi e dei biocarburanti in particolare, con la previsione di un trend di crescita positivo per questo settore (+3,9% annuo a livello europeo per il periodo 2011-2035) mentre è prevista una contrazione del settore combustibili fossili (1,4% annuo) (IEA-World Energy Outlook 2013).

A livello europeo, al contrario di quanto avviene nel resto del mondo, è plausibile che l'attività sui biocarburanti si concentri su componenti per diesel fuel data la composizione della flotta automobilistica e commerciale.

Per quanto riguarda gli aspetti tecnologici, i processi su cui le ricerche si stanno focalizzando si possono suddividere in due grandi categorie: i processi biochimici che riguardano sostanzialmente la fermentazione degli zuccheri e quelli termochimici, basati sulla trasformazione chimica dell'intera biomassa.

È prevedibile che gli sviluppi tecnologici nei processi di fermentazione e delle reazioni metaboliche possano, in un prossimo futuro, permettere di ottimizzare le proprietà chimico fisiche dei prodotti per ottenere componenti da aggiungere a qualunque tipo di combustibile, sia per aviazione sia per trasporto su strada (drop-in biofuel).

Molto attraente appare ovviamente la possibilità di utilizzo di biomasse acquatiche (per esempio le microalghe), dal momento che non si andrebbero a sottrarre terreni fertili alla coltivazione di colture destinate alla alimentazione umana o animale.



SCHEMA DELLE TECNOLOGIE PER LA PRODUZIONE DI BIOCARBURANTI AVANZATI

Il quadro normativo che regola il settore e che ha determinato l'interesse verso nuove tipologie di biocarburanti può essere riassunto come segue:

- la direttiva europea sulle energie rinnovabili (2009/28/EC Renewable Energy Directive, RED) facente parte del Pacchetto clima-energia[21]; in data 3 giugno 2014 è stata pubblicata la posizione adottata dal Consiglio europeo per la revisione della precedente direttiva RED che conferma l'obiettivo di una quota pari al 10% di energia rinnovabile nel settore dei trasporti per il 2020 e stabilisce un limite del massimo del 7% alla quota di biocarburanti di prima generazione. La proposta introduce anche un meccanismo di "double counting" in termini energetici per determinati biocarburanti di nuova generazione considerati più sostenibili. La quota minima di biocarburanti avanzati da raggiungere entro il 2020 è fissata allo 0,5% lasciando ai singoli paesi membri la facoltà di aumentarla e stabilire un proprio target nazionale. L'Italia è stato il primo stato europeo a recepire la direttiva e fissare i propri obiettivi per i biocarburanti avanzati che arrivano fino al 2% nel 2022. Nell'ottobre del 2014 il Consiglio europeo ha approvato il quadro 2030 per il clima e l'energia, ribadendo l'impegno a lungo termine dell'Unione a perseguire l'ambiziosa strategia sul fronte delle energie rinnovabili. Il nuovo quadro stabilisce che nel 2030 il consumo di energia da fonti rinnovabili nell'Unione sia pari ad almeno il 27%: si tratta di un obiettivo vincolante a livello di Unione da realizzarsi mediante contributi individuali degli Stati membri. Il Parlamento europeo ha inoltre chiesto alla Commissione di proporre disposizioni in materia e aumentare ulteriormente il livello minimo di ambizione, portandolo al 30%. Le proiezioni del sistema energetico dell'Unione indicano che, in assenza di nuove politiche nell'Unione e negli Stati membri, con quelle attualmente in vigore la quota di rinnovabili nell'energia consumata nel 2030 si aggirerebbe soltanto sul 24,3%. Questo livello è molto al di sotto dell'obiettivo vincolante minimo del 27% concordato dal Consiglio europeo.
- l'attuale quadro a orizzonte 2020 fissa un obiettivo del 20% di consumo di energia da realizzare mediante obiettivi nazionali giuridicamente vincolanti. Le indicazioni sono

21 Pacchetto Clima 20-20-20 - Regolamento CE n. 443/2009; Direttiva 2009/28/CE, Direttiva 2009/29/CE, Direttiva 2009/30/CE, Direttiva 2009/31/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio; Decisione n. 406/2009/CE (GUUE L140 del 5 giugno 2009)

contenute nella proposta di Direttiva del Parlamento Europeo e del Consiglio sulla promozione dell'uso di energia da fonti rinnovabili del 23 febbraio 2017. I piani d'azione nazionali per le energie rinnovabili e il monitoraggio biennale previsto dalla direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili si sono dimostrati strumenti efficaci nel promuovere la trasparenza per gli investitori e gli altri operatori economici, e hanno quindi favorito il rapido aumento della quota delle energie rinnovabili, che dal 10,4% nel 2007 è salita al 17% nel 2015.

- la Direttiva sulla qualità dei carburanti (2009/30/EC Fuel Quality Directive, FQD), che fissa al 6% di riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra tra il 2010 e il 2020);
- la European Industrial Bioenergy Initiative (EIBI)[22] del SET Plan (Strategic Energy Technology Plan) che si prefigge di promuovere nuove tecnologie per la produzione di biocarburanti di nuova generazione a partire soprattutto da biomasse lignocellulosiche (come il bioetanolo) e per la produzione combinata di calore ed elettricità e di prodotti intermedi a partire da biomasse;
- La White Paper Roadmap che annovera la creazione di una Single European Transport Area per fornire una rete di trasporti integrata e maggiormente competitiva con quella attuale. In questo contesto, il documento medesimo include per la prima volta l'obiettivo di portare al 40% l'uso di combustibili sostenibili nell'aviazione entro il 2050.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Il quadro normativo sopra delineato, la continua crescita della domanda di biocarburanti e la ricerca/sperimentazione di nuove tecnologie potrebbe portare a nuove dinamiche di mercato nel settore delle energie rinnovabili ed in particolare ad un maggior valore aggiunto nell'utilizzo di biomassa lignocellulosica.

In questo contesto, la maturità industriale di tecnologie attualmente in fase di sviluppo potrebbe rappresentare un'opportunità per la riconversione od il recupero di siti industriali che per motivi economici sono in questo momento non più sostenibili, quali ad esempio raffinerie convenzionali, e che in caso di chiusura o ridimensionamento avrebbero pesanti conseguenze a livello sociale.

Al fine di promuovere lo sviluppo di nuove tecnologie di produzione di biocarburanti che rientrino nei criteri e negli obiettivi definiti dalla normativa attuale appare necessario:

- Facilitare il processo di definizione di standards per i biocarburanti avanzati, con particolare riferimento a quelli di tipo drop-in, affinchè ne sia certificato/consentito l'uso sia in aviazione che nel trasporto stradale e marittimo;
- Lavorare a livello di supply chain per definire certificazioni di sostenibilità che siano accettate a livello mondiale;
- Sviluppare ulteriormente il concetto di bioraffineria nell'ambito delle tecnologie di seconda generazione inserendolo in un contesto internazionale e non più solo italiano.
- Mirare dei sistemi di bioraffineria energeticamente auto-sostenibile mediante l'implementazione del concetto innovativo di 'process integration', proprio delle tecnologie di seconda

22 http://www.biofuelstp.eu/eibi.html

generazione.

- Individuare percorsi e strumenti di finanziamento che permettano la realizzazione di progetti inerenti biocarburanti di seconda generazione.
- Definire strategie di comunicazioni più efficaci che evidenzino i benefici legati ai biocarburanti prodotti da risorse rinnovabili sostenibili rispetto a quelli derivanti da materie prime in competizione con il settore alimentare.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Processi biochimici

Soluzioni ingegneristiche e biotecnologiche innovative hanno rappresentato l'elemento chiave per consentire lo sviluppo di processi efficienti e sostenibili a scala industriale per la produzione di biocarburanti avanzati da biomasse non alimentare. Un esempio notevole è il bioetanolo cellulosico ottenuto da colture dedicate quali la canna comune (Arundo donax) o da residui di lavorazioni agricoli (e.g. paglia). Queste tecnologie consentono infatti di trasformare le cellulose e le emicellulose dapprima in zuccheri semplici e quindi in etanolo.

Proprio sfruttando i progressi ottenuti nella produzione di bioetanolo cellulosico, in Italia é stato realizzato –primo al mondo- un impianto con una produzione di oltre 40* 103 t/anno.

L'uso di biomasse della tipologia sopra indicata ha il vantaggio di valorizzare residui che altrimenti rappresenterebbero dei rifiuti da smaltire, ma anche quello di recuperare alla produzione terreni abbandonati o marginali con possibilità di miglioramento del reddito per gli operatori del settore. Vi è inoltre la possibilità, come mostrato in alcuni casi, che la coltivazione di determinate specie possa contribuire alla bonifica di siti parzialmente inquinati (soil remediation) e al contempo di fissare la CO_2 atmosferica aumentando la concentrazione di carbonio nel suolo stesso.

Un altro aspetto che va evidenziato è che le rese per ettaro delle biomasse lignocellulosiche sono particolarmente alte nell'area mediterranea. Queste possono arrivare fino a 40 tonnellate per ettaro, in confronto con rese dell'ordine di 8-9 tonn nel caso della granella di mais.

Ciò corrisponde a circa 8 tonnellate di bio-etanolo cellulosico contro le 3 tonnellate per ettaro del bio-etanolo da mais. A ciò si deve aggiungere che il bio-etanolo cellulosico determina un abbattimento delle emissioni di gas serra di oltre l'80% rispetto ai combustibili fossili convenzionali, per di più ad un costo assolutamente competitivo rispetto ai biocarburanti di prima generazione.

Infine, in un'ottica di bioraffineria integrata, i sottoprodotti della produzione di biotenaolo (e.g. la lignina) possono essere utilizzati per produrre energia e rendere l'impianto energeticamente autosufficiente ma anche altri biocarburanti come quelli per aviazione o altri prodotti chimici come gli oli fenolici. Ciò ricorda da vicino quanto avviene nelle raffinerie tradizionali che partendo dal greggio producono sia prodotti chimici che vettori energetici.

In Italia la ricerca sta proprio puntando a sviluppare questo concetto di bioraffinerie avanzate mediante la messa a punto di processi biochimici che consentano una valorizzazione completa delle materie prime (seconde) utilizzate. Solo in questo modo sarà possibile ottenere prodotti non solo sostenibili da un punto di vista ambientale ma anche competitivi nei costi con gli omologhi prodotti di origine fossile.

Processi termochimici

La conversione termochimica dell'energia presente nelle biomasse può essere ottenuta con diversi processi, quali la combustione, la pirolisi e la gassificazione.
La combustione è il processo più tradizionale, per essere efficiente richiede la riduzione del contenuto d'acqua della biomassa. L'efficienza degli impianti di combustione è dell'ordine del 20-25%, quindi piuttosto modesta. Tale rendimento si può abbassare ulteriormente se la biomassa di partenza ha un potere calorifico basso, dovuto essenzialmente ad un contenuto di umidità elevato.
La pirolisi è un processo di conversione termochimica della materia organica, chiamata anche distillazione a secco, che si basa sulla trasformazione della biomassa ad opera del calore, in forte carenza di ossigeno. Nella pirolisi la biomassa viene trasformata in un vapore a circa 500°C, pressione atmosferica, con tempi di reazione molto brevi; successivamente il gas prodotto viene rapidamente condensato a formare bio-olio ad elevato contenuto energetico, facilmente trasportabile e conservabile per lungo tempo senza problemi di degradazione.
La gassificazione è un processo fisico chimico per mezzo del quale si trasforma un combustibile solido (legno, biomasse vegetali in genere) in un combustibile gassoso. Il processo consiste in un'ossidazione incompleta dei composti carboniosi portati ad elevata temperatura (circa 1000 °C) in ambiente carente di ossigeno. Il gas ottenuto, chiamato syngas, composto da idrogeno e ossido di carbonio, può essere convertito in un combustibile liquido attraverso un processo di Ficher-Tropsch. Il grande vantaggio è la flessibilità dell'utilizzo di svariati feedstock.

Microalghe

La coltivazione delle microalghe in specchi d'acqua aperti (open ponds) o reattori speciali rappresenta una delle alternative più discusse ed interessanti di biomasse più tradizionali di origine agricola e forestale. Il principale vantaggio è rappresentato dalla possibilità di catturare la CO_2 per via fotosintetica, per esempio prodotta da impianti per la generazione di energia elettrica, che viene trasformata in prodotti a elevato contenuto energetico quali gli oli algali, chimicamente analoghi agli oli di origine vegetale. La resa delle microalghe è proporzionale all'irraggiamento solare della zona di coltivazione. Pertanto a livello europeo l'area ottimale è naturalmente rappresentata dal bacino del Mediterraneo e la resa potrebbe raggiungere valori parecchie volte superiori a quelle di colture più tradizionali come la palma coltivata nelle aree equatoriali. Gli elevati costi di investimento e di produzione sono i fattori che al momento hanno frenato lo sviluppo di tale tecnologia ed un ulteriore sforzo in termini di ricerca è necessario per superare queste barriere considerante le elevate potenzialità.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

Aspetti non strettamente tecnologici, ma necessari, riguardano gli standard e la certificazione per l'utilizzo dei biofuels, il miglioramento della supply chain per sviluppare ulteriormente certificazioni di sostenibilità accettate a livello mondiale, l'integrazione del concetto innovativo di "process integration" allo scopo di generare un sistema di bioraffineria energeticamente auto-sostenibile. Si stima che le risorse economiche necessarie per un adeguato sviluppo delle tecnologie di biofeedstock siano pari a 150 milioni di euro nell'arco di un triennio.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 9

NUOVI PROCESSI DI FERMENTAZIONE

Il settore dei trasporti, rappresenta nei paesi occidentali circa un terzo dei consumi di energia primaria, ed è quello nel quale gli interventi tesi alla diversificazione delle fonti ed alla riduzione delle emissioni inquinanti sono più faticosi, essenzialmente per l'attuale ridotta disponibilità di alternative rispetto ai combustibili tradizionali. In questo contesto, i biocarburanti rappresentano l'unica opzione disponibile nel breve termine.

L'impulso dato dall'UE alla produzione su larga scala di biocarburanti si inserisce nel quadro della politica energetica ed ambientale comunitaria e risponde a molteplici fini favorendo anche l'autonomia energetica e la diversificazione delle fonti di approvvigionamento.

I biocarburanti oggi commercialmente disponibili si riducono sostanzialmente al bioetanolo e al biodiesel, con una quota crescente di green diesel ottenuto da processi di idrogenazione di oli vegetali.

La quasi totalità di questi biocarburanti è classificata di "prima generazione", ottenuta cioè a partire da colture cerealicole, amidacee, zuccherine o oleaginose, in competizione con i settori dell'alimentazione umana o animale.

Negli ultimi anni l'innovazione nel settore si è perciò focalizzata sulla sostituzione dei feedstock di prima generazione con biomasse di scarto, quali i residui agricoli e forestali, le colture lignocellulosiche dedicate all'uso energetico e la frazione organica dei rifiuti urbani, portando alla produzione di biocarburanti definiti "avanzati" che garantiscono significative riduzioni dell'emissione di gas a effetto serra, limitando il cambiamento indiretto della destinazione dei terreni e evitando la competizione con l'uso alimentare.

Questi aspetti critici sono stati recepiti nella Direttiva 2015/1513/CE e dalla successiva proposta di aggiornamento (RED II) del 2018, che traguarda per il settore dei trasporti una quota di rinnovabili del 14% per il 2030 con un tetto del 7% per la prima generazione e una crescente richiesta di biocarburanti avanzati (da 0,2% nel 2022 fino al 3,5% al 2030). Questi nuovi obiettivi fungeranno da traino per lo sviluppo di nuove filiere produttive, promuovendo in particolare il mercato dei biocarburanti avanzati.

Dal punto di vista tecnologico, i processi per la produzione di biocarburanti sono classificabili come termochimici (es. pirolisi, gassificazione e liquefazione idrotermale) e biochimici (es. fermentazione, biosintesi aerobica, digestione anaerobica e biofissazione della CO_2).

In questo capitolo saranno descritti in particolare i processi biologici basati sulla fermentazione e sulla biosintesi aerobica.

La fermentazione è una via metabolica, caratteristica di batteri e lieviti, che permette ai microorganismi di ricavare energia da substrati organici (carboidrati o amminoacidi) in assenza di ossigeno. Dal punto di vista strettamente chimico la fermentazione è una disproporzione,

ovvero una ossidoriduzione in cui la stessa molecola viene in parte ossidata ed in parte ridotta. La biosintesi aerobica avviene invece in presenza di ossigeno dove l'energia è ottenuta attraverso l'ossidazione completa di parte del glucosio a CO_2 con accumulo dei prodotti di interesse come metaboliti secondari. Il vantaggio delle trasformazioni biologiche rispetto a quelle termochimiche è la selettività dei microorganismi, che sono in grado di trasformare molecole complesse e ricche di ossigeno (nei carboidrati il rapporto molare C/O è 1) in singoli prodotti con elevato rapporto C/O, idonei all'uso come biocarburanti. Le materie prime di base per i processi fermentativi sono gli zuccheri, direttamente estratti in forma monomerica dalle biomasse saccarifere (es. canna e barbabietola da zucchero) o ottenibili tramite processi di saccarificazione dei carboidrati (amido, cellulosa, emicellulosa) presenti nelle biomasse amidacee (es. mais e grano) e lignino-cellulosiche (es. scarti agricoli, residui forestali, energy crops).

Le biomasse saccarifere e amidacee sono attualmente le più utilizzate come fonte di zuccheri grazie alla facilità con cui questi sono estratti o ottenuti dopo blandi trattamenti di idrolisi della componente amidacea. I biocarburanti prodotti da tali fonti sono però classificati di "prima generazione". Per ottenere biocarburanti avanzati occorre partire da biomasse lignino-cellulosiche, che però, a causa dell'elevata stabilità all'idrolisi della componete cellulosica, richiedono processi di saccarificazione complessi e costosi che hanno fino ad ora ritardato la commercializzazione di tali prodotti. La cellulosa può essere idrolizzata direttamente con metodi chimici (es. trattamento con acidi diluiti o concentrati come H_2SO_4, H_3PO_4 o SO_2) che presentano però lo svantaggio di una bassa selettività e della produzione di inibitori dei processi di fermentazione.

I metodi attualmente utilizzati consistono in un pretrattamento fisico/meccanico per destrutturare la biomassa (es. steam explosion) seguito da un'idrolisi enzimatica, che, rispetto a quella chimica, garantisce una maggiore selettività, ma con complessità tecnologica e costi più elevati.

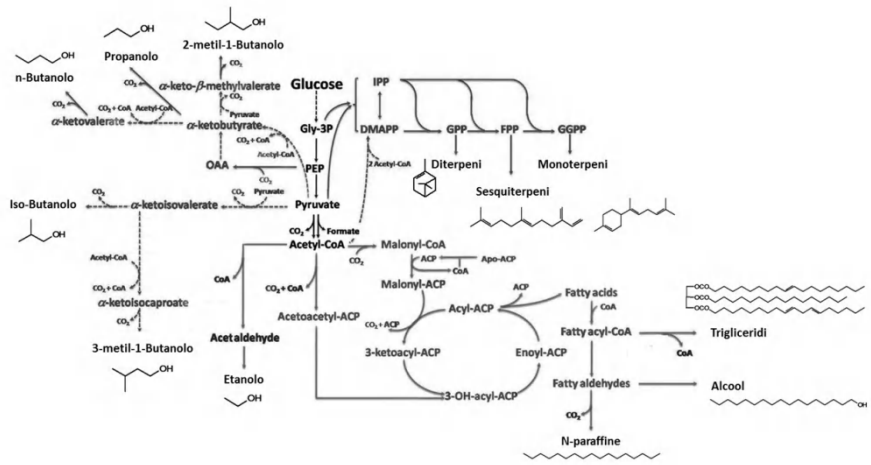


FIGURA 1: VIE METABOLICHE PER LA PRODUZIONE DI BIOCARBURANTI

Gli zuccheri così ottenuti possono essere alimentati nei processi di fermentazione utilizzando diverse specie di microorganismi in grado di produrre in modo selettivo i prodotti di interesse.
Nella figura 1, è riportato uno schema semplificato del metabolismo cellulare, evidenziando i diversi prodotti ottenibili, che comprendono: alcoli C2-C5, trigliceridi, terpeni e idrocarburi.
Nella Tabella 1 sono riportate le rese teoriche dei diversi processi fermentativi, espresse come grammi di prodotto/grammi di zucchero consumato, la percentuale di ossigeno nel prodotto e le rispettive rese energetiche calcolate sulla base del potere calorifico del glucosio di partenza.
Le rese ponderali più elevate si ottengono nel caso delle fermentazioni ad alcoli, a scapito però di un minore potere calorifico dei prodotti, dovuto alla presenza di una quantità residua di ossigeno.
Dai processi fermentativi è possibile ottenere, anche se con rese inferiori, prodotti completamente idrocarburici, utilizzabili come "drop-in" fuel.

TABELLA 1. RESE METABOLICHE ED ENERGETICHE DEI PROCESSI DI FERMENTAZIONE (1)

PRODOTTO	RESA METABOLICA (2)	POTERE CALORIFICO MJ/KG	CONTENUTO DI O NEL PRODOTTO	RESA ENERGETICA (3)
Etanolo	51%	29,7	34,8%	97%
n-Butanolo	41%	36,1	21,6%	95%
iso-Butanolo	41%	35,9	21,6%	94%
3-metil-1-butanolo	33%	37,7	18,2%	80%
Acido stearico	35%	39,4	11,3%	88%
Farnesene	25%	47,0	0%	75%
Squalene	25%	47,0	0%	75%
Pentadecano	29%	47,0	0%	87%

(1) Fonte: Dellomonaco et al., Microbial Cell Factories 2010, 9:3
(2) Valore teorico calcolato come g prodotto/g glucosio x 100
(3) Calcolata rispetto al potere calorifico del glucosio (15,55 MJ/kg)

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

La domanda di biocarburanti è prevista in continua crescita sulla spinta del contesto legislativo, e porterà alla creazione di un nuovo mercato nel settore delle energie rinnovabili. Il consolidamento di tecnologie che si trovano attualmente nello stadio di sviluppo o dimostrazione offrirà delle opportunità per il recupero e la riconversione di siti industriali, quali le raffinerie convenzionali, che, a causa dello scenario macroeconomico, non risultano più sostenibili e, in mancanza di alternative sarebbero destinati alla chiusura o al ridimensionamento con un forte impatto a livello sociale.
Per supportare lo sviluppo delle nuove piattaforme biotecnologiche, conformi agli obiettivi stabiliti delle normative vigenti, è inoltre necessario:

- facilitare lo sviluppo degli standard per biocarburanti avanzati e la loro certificazione per l'utilizzo nell'autotrazione, e nel trasporti aerei e marittimi;
- migliorare ed implementare la supply chain per sviluppare ulteriormente certificazioni di sostenibilità accettate a livello mondiale;
- potenziare il nuovo concetto di bioraffineria già sviluppato in Italia allargandolo nell'ambito delle tecnologie di seconda generazione;
- sviluppare il concetto di economia circolare allo scopo di generare un sistema di bioraffineria energeticamente auto-sostenibile.

- promuovere la rimessa a coltura di terreni abbandonati o marginali, con conseguente creazione di reddito integrativo per il mondo agricolo;
- promuovere la bonifica di suoli inquinati utilizzando opportune biomasse (fito-remediation) poi riciclabili per la produzione di biocarburanti;
- definire strutture di finanziamento in grado di facilitare la realizzazione di progetti inerenti biocarburanti di seconda generazione.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Le biotecnologie, corredate da un'opportuna scelta di soluzioni ingegneristiche, rappresentano la chiave grazie alla quale è stato possibile sviluppare processi efficienti e sostenibili su scala industriale, per la produzione di biocarburanti, anche se prevalentemente di prima generazione. Segue un'analisi delle principali tecnologie.

Etanolo

È il principale biocarburante prodotto tramite processi fermentativi. La produzione mondiale nel 2017 è stata pari a 83 milioni di tonnellate. I principali feedstock impiegati sono il mais (52% del totale) e la canna da zucchero (29%).

Si tratta di una fermentazione anaerobica che utilizza ceppi quali: Saccharomyces cerevisiae (lievito), Zymomonas mobilis, Escherichia coli, Pichia stipites, Thermoanaerobacter e Clostridium thermocellum (batteri), ingegnerizzati per aumentare la resa volumetrica a etanolo (tipicamente 12.0–17.0% w/v), utilizzare sia zuccheri esosi che pentosi, resistere alla temperatura (fino a 70°C) e aumentare la resistenza agli inibitori (tipicamente acido acetico e derivati furanici) presenti negli idrolizzati.

Negli ultimi anni sono state avviate anche iniziative commerciali per produrre etanolo da residui ligninocellulosi, la prima delle quali in Italia, fra queste:

- 2013 Beta-Renewable – Crescentino (Italia) - 60 kt/a con tecnologia Proesa
- 2014 Granbio Alagoas (Brasile) - 65 kt/a
- 2015 Raizen (Shell) – Costa Pinto (Brasile) – 30 kt/a
- 2014 POET-DSM Advanced Biofuels – Emmetsburg, Iowa - 60 kt/a
- 2014 Abengoa - Hugoton, Kansas – 75 kt/a
- 2014 DuPont - Nevada, Iowa – 90 kt/a

Butanolo

Rispetto all'etanolo, il butanolo offre i vantaggi di un minore contenuto di ossigeno, minore volatilità e igroscopicità che consentono una miscelazione con la benzina fino al 16% v/v (10% per l'etanolo). Viene ottenuto attraverso un processo di fermentazione anaerobica, derivato dal processo ABE (Acetone-Butanolo-Etanolo) utilizzato in passato per la produzione di solventi. Attualmente sono stati sviluppati ceppi ingegnerizzati in grado di produrre selettivamente n-butanolo o isobutanolo, prodotto che presenta una minore tossicità per le cellule e può essere trasformato chimicamente in drop-in fuels. Le produttività volumetriche sono inferiori a quelle dell'etanolo (3,5% w/v per iso-BuOH vs 12-17% per EtOH).

I principali players mondiali nel campo del butanolo sono Butamax (una joint venture fra BP and

DuPont) e Gevo. La prima propone una tecnologia per la riconversione di impianti a etanolo, sfruttando le facilities già esistenti. La seconda, oltre all'iso-butanolo, ha sviluppato anche un processo catalitico di disidratazione a iso-butene e successiva oligomerizzazione a dare miscele di idrocarburi taglio diesel e jet-fuel. Per entrambe queste tecnologie non esistono ancora realizzazioni su scala commerciale.

Acidi grassi

Utilizzando specifici microorganismi (lieviti oleaginosi) è possibile indirizzare la fermentazione, in questo caso aerobica, verso la produzione di oli microbici (trigliceridi) che le cellule accumulano al loro interno (fino al 70% della massa cellulare) come riserve energetiche: $C_6H_{12}O_6 + 2/9\ O_2 \leftrightarrow 2/9\ C_{18}H_{36}O_2 + 2\ H_2O + 2\ CO_2$.

Gli oli microbici così ottenuti costituiscono un'alternativa agli oli vegetali (es. palma e colza) nei processi per la produzione di biodiesel e di green diesel. Se gli zuccheri alimentati sono derivati da scarti lignino-cellulosici, i biocarburanti prodotti sono classificati come avanzati. Le minori rese ponderali (max 35% rispetto al glucosio) sono inferiori di quelle ottenibili per l'etanolo (max 51%). Questo svantaggio è però compensato dal maggior potere calorifico degli oli (39,4 vs 29,7 MJ/kg).

Questa tecnologia si trova attualmente allo stadio di sperimentazione su scala pilota.

Le compagnie attive nel settore sono: Eni, Exxon/REG, BP/DSM e Neste/DONG.

Tramite l'ingegneria metabolica è possibile modificare la via di sintesi dei lipidi inserendo uno stadio di decarbossilazione che porta alla produzione diretta di paraffine lineari. Questa opzione è attualmente nello stadio di sperimentazione di laboratorio.

Terpeni

L'ingegnerizzazione della biosintesi dei terpeni (via unità C5 isoprenica) ha permesso di selezionare microorganismi in grado di trasformare il glucosio in sesquiterpeni (C15).

La società americana Amyris, in partnership con Total e in seguito con DSM, ha sviluppato il processo fino alla scala commerciale, avviando nel 2013 un impianto da 24 kt/a in Brasile, alimentato con zucchero di canna. Vengono utilizzati ceppi di lievito ingegnerizzati per la produzione di prodotti lineari (farnesene) utilizzabili come diesel e jet-fuels, o di prodotti ciclici come l'artemisina (farmaco antimalarico).

Fermentazione di feedstock gassosi

Sempre grazie a interventi di ingegneria metabolica, Lanzatech (NZ) ha sviluppato dei microorganismi in grado di utilizzare feedstock gassosi contenenti CO, CO_2 e H2 come substrati per la produzione di etanolo.

In particolare, è possibile utilizzare gas da acciaieria o syngas prodotto da rifiuti:

- $6\ CO + 3\ H_2O \rightarrow C_2H_5OH + 4\ CO_2$ ($CO/H_2 = 1/0$) Gas da acciaieria
- $3\ CO + 3\ H_2 \rightarrow C_2H_5OH + CO_2$ ($CO/H_2 = 1/1$)

Lanzatech, in partership con l'acciaieria Jintang (Cina) ha avviato nel 2017 un impianto commerciale che utilizza le emissioni gassose del sito per produrre 46 kt/a di etanolo.

RISORSE ECONOMICHE STIMATE

Aspetti non strettamente tecnologici, ma necessari, riguardano gli standard e la certificazione per l'utilizzo dei biofuels, il miglioramento della supply chain e delle certificazioni di sostenibilità e l'integrazione in un sistema di bioraffineria energeticamente auto-sostenibile. Si stima che le risorse economiche necessarie per un adeguato sviluppo delle tecnologie di fermentazione profuel siano pari a 200 milioni di euro nell'arco di un triennio.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 10

GREEN REFINERY: SCHEMA INTEGRATO PER UNA RAFFINAZIONE SOSTENIBILE

Una bio-raffineria è da intendersi come un complesso schema integrato di impianti in grado di produrre prodotti energetici e chemicals sulla falsariga degli impianti di raffinazione tradizionali, grazie ad un'appropriata integrazione fra diverse piattaforme tecnologiche. Le soluzioni applicative sono atte a garantire un uso efficiente delle risorse lungo tutto il ciclo di vita dei prodotti con vantaggi sociali, economici ed ambientali, conformemente ai principi di economia circolare.

Un aspetto particolarmente vantaggioso della bio-raffineria è la flessibilità del suo schema di processo, adattabile alle caratteristiche quali-quantitative delle materie prime e alla differente domanda dei prodotti finiti. A tal proposito, diversi studi suggeriscono che la combinazione in cascata di processi volti alla produzione di un ampio spettro di prodotti da biomasse consente di conseguire un ulteriore guadagno in termini di ricadute ambientali complessive rispetto all'adozione di processi singoli.

I prodotti ottenibili da una bio-raffineria sono tipicamente combustibili liquidi e gassosi, ma non si esclude la possibilità di produrre bioplastiche, prodotti chimici di base e sostanze chimiche, ingredienti per la produzione di alimenti e mangimi per animali, additivi per prodotti cosmetici e farmaceutici e altro ancora. Le tecnologie adottate, che si basano su una molteplicità di processi di natura termochimica, chimica, biochimica e meccanica, si suppongono integrate in modo opportuno sulla base di analisi del ciclo di vita (LCA, Life Cycle Assessment) e di bilanci di materia e di energia delle alternative disponibili e di quelle poi realizzate, al fine di assicurare la sostenibilità tecnica e ambientale del sistema.

Negli ultimi anni, in Europa e nel mondo, sono iniziati i processi di conversione delle raffinerie tradizionali in bio-raffinerie per la produzione di vettori energetici bio. Tale conversione però, è da attribuirsi, nel più dei casi, a pochi impianti (impianti stand alone) e/o alla produzione di uno slate prodotti molto limitato. In Europa, il primo esempio di conversione di una raffineria convenzionale a bio-raffineria, basato su brevetto Eni, è stato avviato da Eni nella raffineria di Porto Marghera (VE). La nuova bioraffineria sfrutta la tecnologia Eni/ Honeywell UOP denominata EcofiningTM per la conversione, mediante idrotrattamento, di olio di origine vegetale in Green Diesel, Green Nafta e Green GPL. Per poter aumentare la flessibilità della bio-raffineria e diversificare il più possibile lo slate prodotti di origine bio è necessario sviluppare uno schema complesso e catalitico, simile a quello di una raffineria convenzionale, in grado di poter processare il maggior numero, in termini di tipologia e qualità, di cariche rinnovabili.

A tal proposito si stanno studiando schemi integrati che possano rendere la bio-raffineria autosufficiente, e non più dipendente da materiali di origine fossile.

Le bio-cariche più largamente diffuse e disponibili a livello mondiale sono rappresentate da due grandi macro famiglie: biomasse oleaginose e lignino-cellulosiche. Allo scopo di minimizzare

le emissioni totali di CO_2 e rendere la produzione di vettori energetici rinnovabili eticamente sostenibile, l'utilizzo di biomasse avanzate (non in competizione con l'alimentazione umana e la mangimistica) rappresenterà un vincolo imprescindibile per lo sviluppo di nuove tecnologie.
In Figura 1 viene riportato uno schema integrato di bio-raffineria che sfrutta differenti cariche in entrata per la produzione di uno slate prodotti diversificato che potrebbe coprire in parte il pool carburanti di una Oil Company.

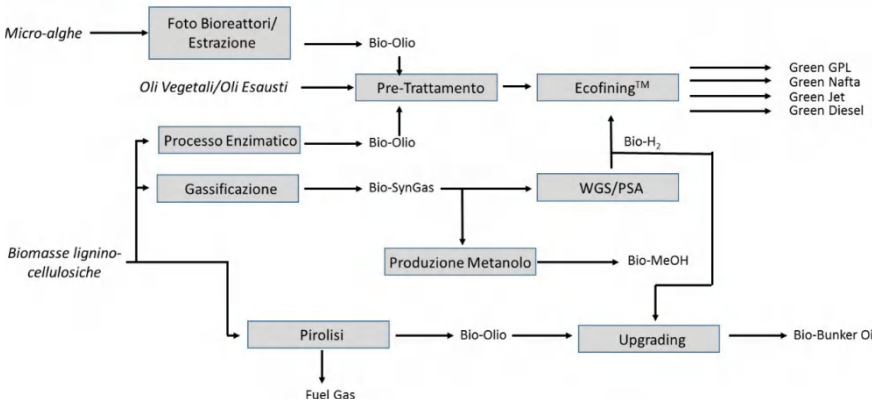


FIG. 1 SCHEMA SEMPLIFICATO DI UNA BIO-RAFFINERIA.

La tecnologia EcofiningTM può rappresentare la tecnologia "cuore" di una bio-raffineria grazie alla sua possibilità di produrre drop-in fuels e uno slate prodotti variegato. Le principali cariche in entrata a questo processo di idrotrattamento sono generalmente biomasse oleaginose, tra le quali, la principale risulta essere l'olio di palma. Come accennato precedentemente, in un'ottica mirata alla produzione di bio-carburanti avanzati, diversificare la materia prima processabile in tale tecnologia è indispensabile. L'utilizzo di un impianto di pre-trattamento delle cariche in ingresso al processo permette la raffinazione di cariche cosiddette "esauste" o di scarto come gli UCO (Used Cooking Oils), grassi animali o sottoprodotti provenienti da impianti chimici per la produzione di bio-chemicals a partire da biomasse oleaginose. Tale impianto di pre-trattamento è in grado, mediante processi fisici/chimici, di raffinare la carica rimuovendo i principali inquinanti dell'olio (es: Fe, P, Ca, Cl, Na, ...), possibili responsabili di avvelenamento e inibizione del catalizzatore di processo.
L'utilizzo di un impianto di pre-trattamento consente inoltre di poter utilizzare come carica alternativa all'olio di palma anche bio-oli prodotti da impianti che trattano/producono biomasse lignino-cellulosiche come:

- foto-bioreattori
- processi Enzimatici

Mediante l'utilizzo di foto-bioreattori è possibile la coltivazione di micro-alghe dalle quali è possibile estrarre un bio-olio analogo agli oli di origine vegetale. I principali vantaggi consistono nella

cattura diretta, per via fotosintetica, dell'anidride carbonica (CO_2) per esempio prodotta da impianti per la generazione di energia elettrica e/o vapore, che viene trasformata in prodotti a elevato contenuto energetico quali gli oli algali. L'olio algale prodotto presenta un elevato contenuto in metalli e fosforo, i quali dovranno essere rimossi nel processo di pre-trattamento.

Analogamente a quanto sopra citato, i processi enzimatici, in grado di processare biomasse lignino-cellulosiche, permettono la produzione di biocarburanti, quali ad esempio il bio-etanolo, oppure l'olio microbico, analogo all'olio di palma, da inviare al processo EcofiningTM per la produzione di Green Diesel.

È da sottolineare come le rese per ettaro di biomasse lignino-cellulosiche risultino estremamente elevate nell'area mediterranea, fino a 40 t di biomassa secca per ettaro contro, ad esempio, le 8-9 t per ettaro per la granella di mais nei casi migliori. Il tutto contribuendo a produrre un biocarburante in grado di garantire una riduzione delle emissioni di gas clima-alteranti di oltre l'80% rispetto ai tradizionali carburanti fossili, ad un prezzo assolutamente competitivo con la cosiddetta prima generazione di biocarburanti.

Inoltre, grazie alla valorizzazione dei coprodotti del processo enzimatico, quali ad esempio la lignina, è possibile produrre energia e vapore per rendere l'impianto energeticamente autosufficiente.

La biomassa lignino-cellulosica sopra descritta è un potenziale feedstock anche per processi di gassificazione e pirolisi. Infatti, una delle principali criticità di una bio-raffineria autosufficiente, è la produzione di bio-idrogeno (bio-H_2). L'idrogeno è una materia prima indispensabile nei processi di idrotrattamento e di upgrading degli oli al fine di migliorare le caratteristiche finali dei bio-carburanti. I processi di gassificazione permettono di concentrare oltre l'80% del potere calorifico nel legame chimico della frazione gassosa, tuttavia in virtù del basso potere calorifico delle biomasse si ottengono temperature insufficienti per raggiungere l'equilibrio e nella miscela gassosa, oltre al SynGas, sono presenti anidride carbonica, acqua, metano, idrocarburi leggeri e tar. Gli idrocarburi prodotti nel primo step della gassificazione dovranno essere convertiti a loro volta in SynGas mediante processi di reforming catalitico o ossidazione parziale. La gassificazione è considerata uno dei sistemi cardini per la produzione di biofuel di seconda generazione, in quanto permette di utilizzare residui forestali, agricoli e rifiuti urbani e industriali; tuttavia i processi che utilizzano ossigeno richiedono spesso economia di scala che porta ad impianti di grandi dimensioni (≥200 MW). Il bio-SynGas così prodotto sarà principalmente utilizzato per la produzione di bio-H_2 mediante processo di Water Gas Shift (WGA) e successiva separazione CO_2/H_2 tramite Pressure Swing Adsorption (PSA). Parte del bio-SynGas verrà inviato invece al processo di produzione del bio-metanolo, un bio-carburante pro benzina che migliora il rapporto H/C e il RON del carburante finale.

Per la produzione di bio-carburante pro bunker oil è possibile sfruttare i processi di pirolisi delle biomasse lignino-cellulosiche. La pirolisi è infatti fra i processi termochimici per la produzione di carburanti avanzati una tecnologia finalizzata alla produzione di vettori liquidi (bio-oli) che permette di arrivare fino a rese del 70% producendo al contempo un gas combustibile e del char.

La frazione liquida risultante (bio-olio) necessita però di un processo di upgrading per ridurre il contenuto di ossigeno e le insaturazioni prima di essere utilizzata come fuel. Tali processi di

upgrading (tipicamente idrotrattamenti) richiedono elevate quantità di H2, ricavabili dai sistemi WGS/PSA precedentemente citati.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

La Commissione Europea è chiamata ad affrontare e favorire la tematica della produzione su larga scala di biocarburanti, con l'elaborazione delle direttive Europee Renewable Energy Directive (RED) e Fuel Quality Directive (FQD) pubblicate ufficialmente nel 2009.

La RED stabilisce l'obbligo, in termini di quantità di energia rinnovabile, da immettere all'interno del settore dei trasporti, mentre la FQD delinea una traiettoria di decarbonizzazione per i combustibili (qualità).

All'interno delle direttive viene dato un forte impulso allo sviluppo dei bio-combustibili cosiddetti avanzati, ossia non in competizione con il food/feed e prodotti a partire da feedstocks esplicitamente citati nell'Annex IX Parte A della RED, bio-combustibili di cui tale normativa richiederà immissione sul mercato in quantitativi sempre maggiori nel corso del decennio 2020-2030.

Nel Giugno 2014 è stata pubblicata la prima revisione della RED con conferma dell'obiettivo di una quota pari al 10% di energia rinnovabile nel settore dei trasporti per il 2020, con quota minima di biocarburanti avanzati pari allo 0,5% (lasciando ai singoli paesi membri la facoltà di aumentarla e stabilire un proprio target nazionale) e limite del massimo del 7% alla quota di biocarburanti di prima generazione, da immettere sul mercato entro il 2020.

I bio-combustibili cosiddetti di prima generazione, ossia in competizione con la catena alimentare umana e animale (da colture oleaginose, cerealicole, amidacee e zuccherine) sono frutto di processi che, al netto del conteggio delle emissioni nell'intero ciclo di produzione, hanno un impatto ambientale – e talvolta anche economico – nettamente più negativo dei cosiddetti avanzati (da biomasse di scarto quali residui agricoli e forestali, materiale lignino-cellulosico, frazione organica dei rifiuti urbani e alro), che garantiscono significative riduzioni dell'emissione di gas a effetto serra (GHG), limitando il cambiamento indiretto della destinazione dei terreni ed evitando la competizione con i settori dell'alimentazione umana o animale. Nel caso di coltivazioni non destinate al food, differenze notevoli in termini di emissioni di CO_2 del processo, sono poi riscontrabili non solo fra le specie, ma anche intraspecie, con "forcelle" attribuibili alla combinazione fra genotipi, fitotecnica e condizioni pedoclimatiche, oltre che per parametri quali consumo idrico, durata del ciclo, ed altre caratteristiche qualitative.

L'Italia è stato il primo stato europeo a recepire la RED e fissare i propri obiettivi per i biocarburanti avanzati che arrivano fino al 2% nel 2022.

RED II. Il 14 Giugno 2018, i negoziatori della Commissione europea, del Parlamento europeo e del Consiglio europeo hanno raggiunto un accordo sulla direttiva RED II che fissa i nuovi obiettivi per le energie rinnovabili nel decennio 2020-2030. Tale accordo provvisorio prevede che l'energia proveniente dalle fonti rinnovabili rappresenti almeno il 32% del consumo finale lordo di energia dell'UE nel 2030, con una clausola di revisione al rialzo entro il 2023. Per i biocarburanti, almeno il 14% del carburante per i trasporti deve provenire da fonti rinnovabili entro il 2030. I biocarburanti di prima generazione basati su colture sono limitati ai livelli del 2020, con al massimo un punto percentuale in più, ma non possono superare il 7% del consumo finale del trasporto stra-

dale e ferroviario. Inoltre, la quota di biocarburanti avanzati e di biogas deve essere almeno pari allo 0.2% nel 2022, all'1% nel 2025 e al 3.5% nel 2030. Le colture alimentari come l'olio di palma che determinano un elevato cambiamento indiretto della destinazione dei terreni (ILUC) devono essere gradualmente eliminate attraverso un processo di certificazione per i biocarburanti a basso tenore di ILUC. Infatti, quando i terreni ad uso agricolo vengono utilizzati per la produzione di biocarburanti, l'agricoltura deve espandersi altrove per soddisfare la domanda esistente (spesso crescente) per coltivazioni destinate all'alimentazione umana e animale. Tale messa in coltura di terra supplementare avviene su foreste, praterie, torbiere, zone umide e altri ecosistemi ricchi di carbonio, generando un processo che comporta un aumento sostanziale delle emissioni GHG, denominato impatto ILUC, (Indirect Land Use Change). Ad oggi, se si tiene conto delle emissioni ILUC, alcuni bio-combustibili di prima generazione hanno in media più emissioni GHG rispetto ai combustibili fossili che dovrebbero sostituire.

Gli Stati membri dovranno quindi recepire i nuovi elementi della direttiva nella legislazione nazionale 18 mesi dopo la sua entrata in vigore (Dicembre 2018), quindi entro il 30 Giugno 2021.

Alla luce di un contesto normativo in evoluzione e alla continua ricerca di una forte riduzione di emissioni inquinanti legate al settore dei trasporti, la strategia vincente appare essere quella di diversificare il più possibile i processi di produzione dei bio-combustibili facendo affidamento su un ampio e variegato portfolio di bio-cariche, anche derivanti dagli scarti delle filiere della chimica verde, realizzando così, un'applicazione virtuosa di economia circolare. Su quest'ultimo aspetto va precisato che esistono requisiti precisi per la misura del grado e livello di economia circolare (Ref. European Environmental Agency, CE «requirements»), che si basano proprio sulla riduzione dell'uso di risorse naturali, estraendo più valore da un numero minore di feedstock e rendendo quindi più efficace l'uso di materie prime, acqua ed energia, sulla riduzione dei livelli di emissione (sia dirette che indirette) nonché delle perdite di materiali di valore, implementando un ciclo chiuso per recuperare e riciclare i materiali, riducendo la produzione di rifiuti, minimizzando l'incenerimento e lo smaltimento e riducendo le perdite di energia e materia.

Così il residuo, che costituisce, di per sé, un potenziale rifiuto, diventa una materia prima secondaria e di conseguenza una nuova risorsa, sfruttando in modo totale la biomassa di partenza e soddisfacendo appieno i suddetti requisiti dell'economia circolare.

Aspetti che rappresentano, ad oggi, possibili criticità e quindi punti di attenzione per studi specifici sono la variabilità quali-quantitativa delle bio-cariche, l'assenza di una logistica adeguata che consenta di connettere in modo efficace i produttori delle materie prime, le bio-raffinerie, gli utilizzatori dei prodotti intermedi e finali e i consumatori, e le aree "grigie" ancora esistenti in alcuni processi con la necessaria individuazione dei criteri per una loro efficace integrazione, in particolare per quanto attiene ad aspetti quali la stabilità, la disponibilità di materie prime, lo scale up, e la definizione di criteri operativi.

L'implementazione delle bio-raffinerie e la creazione di un mercato per i nuovi prodotti sviluppati richiede un adeguato piano strategico e di investimenti, sia nel settore della ricerca che in quello/i del business, promuovendo ad ampio raggio le sinergie tra istituti di ricerca e comparto industriale e favorendo la consapevolezza dei consumatori rispetto ai vantaggi derivanti dall'utilizzo dei bio-prodotti.

Sostenibilità, economicità e facile "scalabilità" sono principi chiave che reggono il complesso sistema della bio-raffineria.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

I primi processi di idrotrattamento di biomasse oleaginose sono stati sviluppati da Neste Oil con la tecnologia NextBTL. A Porvoo (Finlandia) dal 2007 è in produzione un impianto da 190 mila tonnellate annue per la produzione di Green Diesel. Dal 2009 Neste Oil ha raddoppiato la capacità di tale sito, affermando una riduzione delle emissioni di CO_2 del 40-80% sulla base della tipologia di carica processata.

La medesima tecnologia è utilizzata anche nelle bio-raffinerie di Rotterdam e Singapore. Per quest'ultima è stato avviato un processo di espansione che prevede una nuova linea di produzione entro il 2022 che consentirà di processare un totale di circa 1.8 milioni di tonnellate annue di biomassa (FID entro l'anno 2018).

La tecnologia EcofiningTM, sviluppata da Eni sin dal 2005 in collaborazione con Honeywell UOP, per la conversione di biomasse oleaginose è attualmente in produzione presso la bio-raffineria di Eni a Porto Marghera (VE) e in avviamento presso la seconda bio-raffineria Eni di Gela (CL), maggiore per capacità. La capacità di impianto attuale di Porto Marghera è di circa 360 mila tonnellate annue che sarà aumentata a circa 540 mila tonnellate dal nei prossimi anni. La nuova bio-raffineria di Gela, che processerà principalmente bio-cariche avanzate come UCO e grassi animali, avrà una capacità massima di circa 700 mila tonnellate annue. Sul fronte delle bio-cariche avanzate, Eni sta costantemente lavorando sull'individuazione delle tipologie di fonti più idonee a comporre la nuova supply chain alternativa all'olio di palma quale materia prima in alimentazione all'impianto EcofiningTM.

In contesto extra-europeo, usando la tecnologia EcofiningTM, Diamond Green Diesel (Honeywell UOP) è il maggiore produttore di diesel rinnovabile negli Stati Uniti, a partire dal 2013.

Realizzato con il processo UOP Renewable Jet Fuel ProcessTM, il Green Jet Fuel Honeywell, miscelabile in un rapporto 50/50 con kerosene fossile, soddisfa i più rigidi standard di prestazione del carburante avio e può, anch'esso, essere ottenuto da una varietà di materie prime sostenibili.

Honeywell Green Jet Fuel può essere miscelato e offre notevoli vantaggi rispetto al carburante per idrocarburi:

A partire dal 2015, AltAir Fuels (retrofit di una raffineria fossile a Paramount, California), gestisce il primo impianto completo dedicato alla produzione di carburante avio rinnovabile per uso commerciale e militare, tramite UOP Renewable Jet Fuel ProcessTM, mantenendo la flessibilità di adeguare il mix di prodotti tra diesel e jet-fuel per soddisfare le richieste del mercato.

Nell'ambito della medesima tecnologia, Petrixo Oil & Gas è il primo impianto di produzione di carburante per jet rinnovabili su scala commerciale al di fuori del Nord America.

Enerkem, uno dei leader mondiali nella produzione di rifiuti e biocarburanti e bio-chemicals da rifiuti, ha annunciato il futuro avviamento di uno stabilimento avanzato di waste-to-chemistry a Rotterdam, sfruttando la tecnologia proprietaria di produzione metanolo/dimnetiletere da rifiuti, in consorzio con Shell, Air Liquide e Nouryon. Il sito sarà il primo del suo genere in Europa a fornire una soluzione alternativa sostenibile per convertire i rifiuti non riciclabili (360 mila tonnellate

annue di rifiuti misti non riciclabili, platiche incluse) in nuove materie prime (220 mila tonnellate annue di metanolo "green").

Per accennare al sopracitato processo di pirolisi, le maggiori unità commerciali attualmente in produzione in Canada/ Stati Uniti e Europa sono a Port-Cartier, Quebec (capacità in ingresso: 9000 kg/h); Renfrew, Ontario (capacità in ingresso: 3500 kg/h); Rhinelander, Wisconsin (capacità in ingresso: 1667 kg/h); Joensuu, Finlandia (capacità in ingresso: 10000 kg/h); Hengelo, Paesi Bassi (capacità in ingresso: 5000 kg/h).

Negli ultimi anni sul territorio italiano si stanno avviando le prime iniziative su larga scala per processare bio-cariche avanzate e si è assistito alla riconversione di plurimi stabilimenti industriali esistenti, dopo le opportune attività di bonifica, in impianti di bio-raffineria. Come principale esempio di processo enzimatico nel 2014 è stato avviato il primo impianto full scale presso lo stabilimento di Crescentino (VC) per la produzione di etanolo di seconda generazione da parte del gruppo Mossi & Ghisolfi, il cui perimetro "bio" è stato acquisito da Versalis, società chimica di Eni, con decorrenza 1 novembre 2018. La tecnologia adottata utilizza come materia prima la paglia (biomassa lignino-cellulosica) per la produzione di una melassa attraverso un processo di saccarificazione e successiva fermentazione a bio-etanolo con recupero della lignina per la produzione di energia elettrica.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

Gli investimenti richiesti per lo sviluppo e la realizzazione di una bioraffineria per la produzione di uno slate prodotti complesso e con una capacità di lavorazione sufficiente a rendere gli economics di impianto positivi non sono inferiori a 1MLD di euro

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 11

IDROGENO

Con il suo basso impatto ambientale e l'alta densità energetica, l'idrogeno è considerato il vettore di elezione per la decarbonizzazione del settore energetico e la conseguente mitigazione dei cambiamenti climatici. In combinazione con il metano (idrometano) può usufruire delle infrastrutture di trasporto di quest'ultimo ed essere impiegato in processi di combustione, rappresentando il ponte ideale verso l'utilizzo di idrogeno puro. L'idrogeno è tuttavia più opportunamente impiegato come combustibile per l'alimentazione delle "fuel cell" (FC o celle a combustibile), sistemi ad alta efficienza che trasformano direttamente il combustibile in energia elettrica, evitando processi di combustione e quindi raggiungendo alte efficienze (35% - 60%), e avendo come sottoprodotti solo vapor d'acqua e calore. Quest'ultimo, se sviluppato ad alta temperatura, può inoltre essere riutilizzato nel riscaldamento domestico in un unico sistema energetico (Combined Heat and Power Generation, CHP).

Nel caso dell'idrogeno le tecnologie di utilizzo (FC) si sono sviluppate prima di quelle per la sua produzione, tradizionalmente legate al petrolio. Negli ultimi anni tuttavia, la penetrazione delle rinnovabili ha incentivato lo sviluppo di elettrolizzatori: dispositivi cioè che, lavorando in modo inverso ad una FC, utilizzano l'energia elettrica per produrre idrogeno "verde". Le FC di interesse per l'utilizzo dell'idrogeno si trovano tutte a livello tecnologico avanzato (TRL Technology Readiness Level 7-9)[23] così come sono già presenti elettrolizzatori commerciali a bassa temperatura, mentre per l'alta temperatura i primi sistemi si stanno appena affacciando sul mercato.

Di più basso livello di maturità tecnologica sono invece le tecnologie legate alla produzione diretta di idrogeno tramite energia solare (water splitting dell'acqua) che potrebbero in un prossimo futuro giocare un ruolo chiave nella diversificazione delle fonti di approvvigionamento.

Associato con le fonti rinnovabili (fotovoltaico, eolico, biomasse di scarto), da cui può essere prodotto a relativo basso costo tramite opportuni elettrolizzatori, l'idrogeno rappresenta quindi un vettore energetico (cioè un sistema per immagazzinare e/o trasportare energia) di grande interesse. In quest' accezione può essere utilizzato per:

- accumulo di energia elettrica in eccesso (fonti rinnovabili discontinue);
- cogenerazione ad elevata efficienza e ad emissioni quasi zero;
- traffico veicolare ad emissioni zero (veicoli con fuel cell alimentate a idrogeno), con eliminazione delle emissioni in loco di CO_2 e drastica riduzione di altre emissioni inquinanti (NOx, SOx);

23 ENEA-CNR-RSE "Decarbonizzazione dell'economia italiana", Il catalogo delle tecnologie energetiche, a cura di: Alessandra Sanson - CNR e Laura Gaetana Giuffrida – ENEA, 2017 ENEA Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile

- utilizzo energetico di biomasse o altre matrici organiche di scarto (fonti rinnovabili continue di costo nullo o negativo);
- produzione di fuels o fine chemicals ad alto valore aggiunto in combinazione con la CO_2 emessa in loco o catturata e trasportata in luogo opportuno.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Lo sviluppo di combustibili alternativi a basso (o nullo) tenore di carbonio rappresenta, sia in ambito mobile che stazionario, un passaggio chiave per ridurre le emissioni di CO_2 e quindi l'aumento di temperatura globale responsabili dei recenti cambiamenti climatici. In questo senso lo sviluppo di una "economia dell'idrogeno" integrata e sostenibile, oltre ad indubbi vantaggi ambientali può rappresentare un importante fattore di sviluppo economico-industriale. Le tecnologie legate all'idrogeno sono tuttavia al momento ostacolate dal costo dei dispositivi e delle infrastrutture per la sua distribuzione capillare, una limitata accettazione sociale e la mancanza di legislazione adatta. L'idrogeno non è inoltre direttamente disponibile in forma pura ma legato con altri atomi, e deve essere quindi da essi separato tramite processi ad alta intensità energetica. Al momento oltre il 95% dell'idrogeno è, infatti, prodotto da fonti fossili, principalmente lo steam reforming del gas naturale. Per ridurre il suo impatto ambientale, la produzione di idrogeno deve perciò essere legata strettamente all'eccesso di energia proveniente dalle fonti rinnovabili per promuovere l'elettrolisi dell'acqua, l'elettroreforming dei bioalcoli o da processi fermentativi (bio-idrogeno). Questi processi tuttavia richiedono un sostanziale miglioramento legato allo sviluppo di opportuni catalizzatori, microorganismi e materiali capaci di assicurare maggiori rese con minore apporto energetico così come opportuni reattori. Come su accennato, le tecnologie connesse all'utilizzo dell'idrogeno interessano diversi ambiti tra cui:

- l'accumulo di energia elettrica in eccesso (fonti rinnovabili discontinue) mediante produzione di idrogeno da elettrolisi, suo accumulo e successiva produzione di energia elettrica tramite fuel cell o immissione nella rete gas[24, 25, 26]; l'utilizzo dell'idrogeno potrebbe anche avvenire tramite veicoli o flotte di veicoli, che svolgerebbero così anche funzioni di accumulo, o in cogenerazione per aumentare l'efficienza complessiva[27,28];
- la cogenerazione ad elevata efficienza; in questo caso nelle unità CHP vengono utilizzate celle a combustibile che operano a più alte temperature (MCFC o SOFC) con efficienze globali superiori (80% e oltre), particolarmente interessanti per il loro elevato rendimento anche in piccola taglia (sino a 1-5 kW)[29];

24 Valutazione tecnico-economica dell'applicazione della tecnologia del Power to Gas ad un particolare parco eolico siciliano. Andrea Bartesaghi, POLITECNICO DI MILANO

25 Optimal Use of Power-to-Gas Energy Storage Systems in an 85% Renewable Energy Scenario. Mareike Jentscha, Tobias Trosta, Michael Sterner. Energy Procedia

26 Power-to-Gas technology – the missing link in renewable energy systems. SolarFuel GmbH, Stephan Rieke, Ecosummit, Berlin 23.03.2012

27 Direttiva Europea DAFI 2014/94/UE "Realizzazione di una infrastruttura per i combustibili alternativi"

28 Piano Nazionale di Sviluppo Mobilità Idrogeno Italia marzo 2016

29 Dossier The Yellow Pages of SOFC Technology, IEA Implementing Agreement Annex 24 SOFC, S. McPhail, L. Leto, C. Boigues-Munoz

- la produzione di combustibili da rifiuti (biomasse o altre matrici organiche di scarto) sia per la produzione di idrogeno, sia per incrementare le rese da biomasse in metano (digestione anaerobica in doppio stadio)[30];
- l'utilizzo di idrogeno per la conversione di CO_2 in metano (secondo la reazione $CO_2 + 4\ H_2$ -> $CH_4 + 2\ H_2O$[31] o di altri combustibili o importanti building blocks per l'industria chimica.

Lo sviluppo di tutte queste tecnologie è strettamente legato all'individuazione di materiali e dispositivi efficienti, a basso costo e facilmente industrializzabili che permettano buone performances in esercizio per un discreto numero di ore.
Accanto a questo, è importante la riduzione di materiali rari o critici (terre rare, metalli nobili), in un'ottica di riduzione dell'utilizzo di risorse e di economia circolare.
Il trasporto dell'idrogeno rappresenta da sempre un ulteriore ostacolo alla penetrazione della tecnologia. Tuttavia, lo sviluppo di sistemi ad elettrolizzatori rappresenta un'importante alternativa, permettendo la produzione di idrogeno in situ (tramite l'utilizzo di energia in eccesso, proveniente per esempio da rinnovabili), il suo stoccaggio e utilizzo successivo sia come combustibile per applicazioni mobili che per la produzione di energia in ambito stazionario.
Nel caso di produzione non delocalizzata proveniente quindi da grossi impianti, rimane la necessità di sviluppare un'opportuna rete di distribuzione, stazioni di rifornimento e un adeguato sistema normativo che, alla pari di quanto recentemente ottenuto per il biogas, permetterebbero una diffusione più capillare delle tecnologie associate. È comunque importante tenere a mente come sia i sistemi di rifornimento che di distribuzione, con opportune modifiche e valorizzazione non divergono molto dalla rete del gas naturale, particolarmente sviluppata nel Centro-Nord Italia, su cui potrebbero tendenzialmente poggiare.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Dopo un periodo di sostanziale stasi, l'idrogeno sta rientrando nelle politiche energetiche industriali sia come importante vettore energetico pulito che come importante reagente per la valorizzazione di scarti industriali e di biossido di carbonio. Importante in questo senso la costituzione nel gennaio 2017 di quello che viene chiamato l'Hydrogen Council. Tredici importanti attori industriali (Air Liquide, Alstom, Anglo American, BMW GROUP, Daimler, ENGIE, Honda, Hyundai Motor, Kawasaki, Royal Dutch Shell, The Linde Group, Total and Toyota) si sono riuniti a Davos in Svizzera per lanciare l'iniziativa globale che evidenzi l'importanza dell'idrogeno come vettore energetico principale nella transizione energetica verso un'economia low carbon.
Il vettore idrogeno è già sviluppato e competitivo in molte applicazioni:

- dispositivi elettronici portatili;
- cogenerazione (taglie da 1 kW in su);
- sistemi isolati e sistemi di back-up per telecomunicazioni;
- mezzi che si muovono in ambienti pericolosi o dove sono richieste emissioni zero (aeroporti,

30 Energia; Rinnovabili.it "Biogas : il primo impianto bi-stadio in Europa è italiano" 10 ottobre 2017
31 Alternative use of CO_2 V. Barbarossa, G. Vanga, Energia Ambiente Innovazione n° 6/2011

contesti urbani particolari, carrelli elevatori/fork-lifts in ambienti chiusi, applicazioni militari);
- sistemi di accumulo in zone isolate dalle reti energetiche;
- generatori ausiliari per grandi mezzi (navi, camion, ...).

Per ciò che riguarda la produzione di idrogeno in piccola e media scala, è importante dimostrare sistemi di produzione economicamente competitivi. Poiché gli impianti di produzione da biomasse di scarto (per via termochimica o per via biochimica) presentano, specialmente nelle piccole taglie, bilanci energetici poco interessanti (e quindi anche bilanci economici poco sostenibili in mancanza di incentivi pubblici), sono necessarie attività di ricerca e dimostrazione nel campo di piccoli impianti alimentati da biomasse di scarto (a costo nullo o negativo), con aumento dell'efficienza energetica, riduzione dei consumi degli ausiliari (Balance of Plant) e/o loro alimentazione con energie rinnovabili (tramite sistemi di integrazione ed accumulo).
La tematica dell'idrogeno risulta quindi fortemente trasversale rispetto alle tecnologie waste-to-fuel e alle tecnologie di accumulo dell'energia da fonti quali fotovoltaico ed eolico (elettrolisi, accumulo elettrico).
L'idrogeno viene sempre più considerato sia come una potenziale alternativa di accumulo in ambito stazionario, che come un'alternativa importante alle batterie nel settore mobile. Se, infatti, la mobilità elettrica è considerata come la migliore alternativa a quella fossile in ambito cittadino e per vetture di piccola taglia (per quanto l'ambizione è di rendere economicamente equivalenti le auto a FC alle ibride entro il 2025) per le lunghe distanze e la mobilità pesante viene considerata irrealistica la possibilità di utilizzo di accumulatori, sia per il costo che per i lunghi tempi di ricarica. In quest'ultimo caso, l'idrogeno, per il quale il tempo di refueling è comparabile al metano (circa 5 minuti) e permette autonomie dichiarate (fonte Toyota) superiori ai 600 km, potrebbe rivelarsi un'alternativa importante.
La riduzione del costo dell'idrogeno e la sua sostenibiltà ambientale sono importantissime anche ai fini della diffusione delle stazioni di rifornimento per autoveicoli che, ai costi attuali, risultano poco appetibili per gli investitori privati e molto onerose per la fiscalità pubblica (incentivazione). A questo proposito è bene ricordare la Direttiva Europea DAFI 2014/94/UE "Realizzazione di una infrastruttura per i combustibili alternativi" che ha dato luogo al "Piano Nazionale di Sviluppo Mobilità Idrogeno Italia" del marzo 2016.
Secondo tale piano, l'Italia dovrebbe dotarsi di 9 stazioni di rifornimento a idrogeno al 31/12/2020 (destinate prevalentemente a "captive fleet" e ad un costo di 1.300.000 euro/stazione) e di 141 stazioni di rifornimento al 31/12/2025 (94 da 100 kg / giorno di idrogeno e 47 da 50 kg/giorno di idrogeno) destinate alla "mass transportation" cioè autobus e veicoli privati. A livello europeo d'altra parte si segnalano forti attività da parte tedesca (con 30 stazioni al momento attive) della Francia e della Gran Bretagna (rispettivamente 11 e 12 stazioni) e soprattutto da parte danese che prevede circa 50 stazioni per il 2025. A livello internazionale la parte del leone la fanno Stati Uniti (50 stazioni) e soprattutto il Giappone che, con una politica incentivante aggressiva ha puntato fortemente su applicazioni residenziali installando al 2017 più di 100.000 sistemi e puntando ad superare 1.000.000 unità entro il 2020. In questo settore, l'Europa può contare su circa 900 unità distribuite sul continente.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

Al punto 5.7 "Misure di Sostegno" del documento "Piano Nazionale di Sviluppo Mobilità Idrogeno Italia" del marzo 2016, al comma 3 "Ricerca, sviluppo tecnologico e dimostrazione" si evidenzia la necessità di stanziamenti nei bilanci pubblici annuali destinati al sostegno di ricerca, sviluppo tecnologico e dimostrazione sui combustibili alternativi, ripartiti per combustibile e per modo di trasporto, a valere anche, come si accenna nel seguito, sui programmi di ricerca europei quali Horizon 2020, FESR e Fondo Coesione, TEN-T (Trasporti trans-europei) e con i finanziamenti della BEI.

4. TECNOLOGIE PER L'EFFICIENZA ENERGETICA E LA SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 12

SVILUPPO LUBRIFICANTI AUTOTRAZIONE DI NUOVA GENERAZIONE

In conseguenza dei sempre più restrittivi limiti sulla CO_2, viene richiesto al lubrificante di contribuire in maniera significativa alla fuel economy. In relazione alle richieste attuali è stato di recente sviluppato e qualificato un olio in grado di soddisfare la nuova specifica europea ACEA C5-2016, che impone una fuel economy superiore al 3%. Per il mercato internazionale, ove le specifiche di riferimento sono emanate dall'associazione nippo-americana ILSAC, è stato sviluppato un olio con basi bio in grado di superare il limite minimo di fuel economy del 2.6% previsto dalla attuale specifica GF-5. Tuttavia la futura evoluzione ILSAC GF-6, prevista tra il 2019 ed il 2020, imporrà limiti di fuel economy fino al 3.9% richiedendo, oltre alla progressiva riduzione della viscosità, anche la ricerca di additivi friction modifier di nuova generazione, capaci di ridurre gli attriti in maniera durevole nel tempo. Nel contempo il lubrificante deve fornire elevata compatibilità con i sistemi di post trattamento dei gas di scarico, garantire elevate prestazioni in termini di pulizia del motore, usura e prevenzione dei fenomeni di preaccensione, lavorando in un ambiente motoristico reso sempre più severo dalle scelte costruttive pro-fuel economy e dall'impiego di quote bio nei combustibili. Anche le nuove specifiche ACEA G6 e G7, previste per i prossimi anni, recepiranno tali problematiche.

Eni, da sempre impegnata nella ricerca e sviluppo di nuovi lubrificanti, raccoglie la sfida sui lubrificanti del futuro prevedendo lo sviluppo di tecnologie formulative proprietarie in continuità con il lavoro svolto di recente presso il Centro di Ricerca.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

La Commissione Europea ha fissato il target di riduzione della CO_2 emessa dalle nuove flotte autoveicolari, a partire dal 2020, a 95 g/km contro gli attuali 130 g/km (con l'aggiunta di una nuova procedura di valutazione più severa e più aderente alla realtà).

Le tappe previste per l'attuazione a partire dal 2020 sono le seguenti:

- nel 2020 il 95% della flotta dovrà raggiungere l'obiettivo;
- la percentuale salirà al 100% nel 2021 con riduzione dei supercrediti;
- nel 2022 è prevista l'ulteriore riduzione dei supercrediti fino alla loro eliminazione totale dal 2023.

Per supercrediti si intendono delle agevolazioni per le vetture con emissione di CO_2 sotto i 50 g/km (elettriche, ibride plug-in, fuel cell vehicles) che sono conteggiate con un coefficiente di peso maggiore nel calcolo dell'emissione media della flotta. In caso di non soddisfacimento dei limiti sono invece previste multe per le case automobilistiche trasgreditrici.

L'olio lubrificante agisce sugli attriti tra le superfici e pertanto influenza la potenza perduta per attrito e quindi la fuel economy e l'emissione di CO_2. Esso rappresenta un parametro di significativa importanza ai fini del raggiungimento degli obiettivi imposti alle case automobilistiche. Le nuove specifiche emanate dai costruttori e dalle loro associazioni prevedono di dare sempre più enfasi agli aspetti connessi alla fuel economy senza tuttavia trascurare altre problematiche.

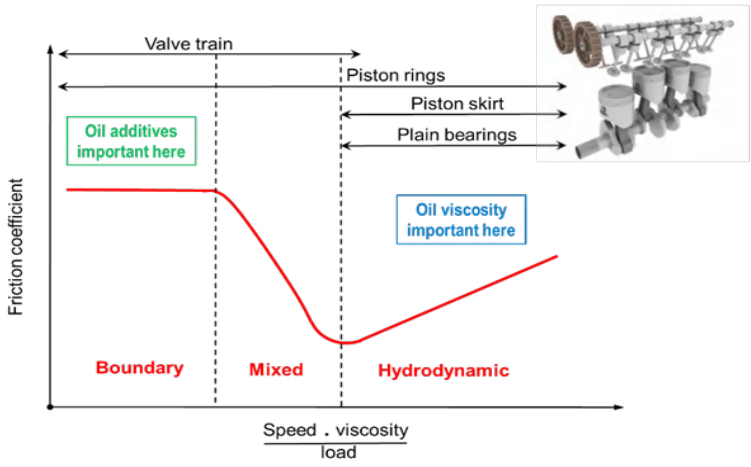
L'OLIO LUBRIFICANTE E L'INSORGENZA DI NUOVE PROBLEMATICHE

Per migliorare le prestazioni "fuel economy" dell'olio lubrificante occorre lavorare sull'ottimizzazione di alcune caratteristiche fisiche e composizionali, le più importanti delle quali sono:

- La viscosità, in particolare HTHS (High Temperature, High Shear), importante nel regime di lubrificazione idrodinamico quando le superfici a contatto sono separate da un velo consistente di lubrificante (es. a livello delle bronzine di banco)
- La presenza di additivi "Friction Reducer" importante nei regimi Mixed e Boundary quando il velo lubrificante si rompe determinando il contatto metallo-metallo tra le superfici stesse (es. accoppiamento camma-punteria)

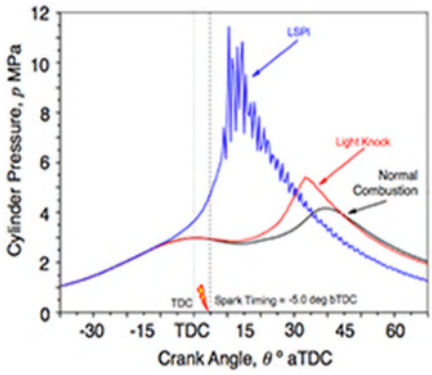
L'effetto della viscosità e degli additivi suddetti sul coefficiente d'attrito è espresso dalla curva di Stribeck riportata di seguito:

The Stribeck Curve : friction in different regimes of lubrication



Accanto alla necessità di contribuire a migliorare la fuel economy riducendo di conseguenza l'emissione di CO_2, l'olio lubrificante deve presentare una elevata compatibilità con i sistemi di aftertreatment più recenti volti a contenere gli inquinanti gassosi (CO, NOx, HC) ed il particolato emessi dai motori a combustione interna nel rispetto della normativa attualmente in vigore. Tale compatibilità viene raggiunta limitando l'uso di additivi contenenti P e S, rispettivamente avvelenante e deattivante nei confronti dei siti catalitici, nonché attraverso la limitazione

degli additivi che apportano ceneri le quali possono depositarsi sul filtro determinando una progressiva occlusione dello stesso.
Inoltre il lubrificante si trova a lavorare in un ambiente motoristico reso sempre più severo dagli stessi ritrovati tecnologici che vengono adottati per il miglioramento dell'efficienza del motore.
Uno dei fenomeni che crea crescente preoccupazione presso i motoristi è costituito dalla "Low-speed pre-ignition" (LSPI): si tratta di un fenomeno di combustione anomala rilevato a basso regime sui motori a benzina di nuova generazione a iniezione diretta, downsized (cioè di cilindrata ridotta rispetto alla potenza erogata) e turbocompressi progettati da alcuni anni a questa parte per garantire migliori consumi specifici.
Il fenomeno è caratterizzato da accensioni spontanee del combustibile che si sviluppano prima dell'accensione comandata e che si manifestano con picchi di pressione che possono superare i 100 bar (10 MPa).



Questo fenomeno nella sua manifestazione più blanda aumenta la rumorosità del motore ma in casi estremi può condurre a danni sui pistoni, sugli anelli e sulla biella.

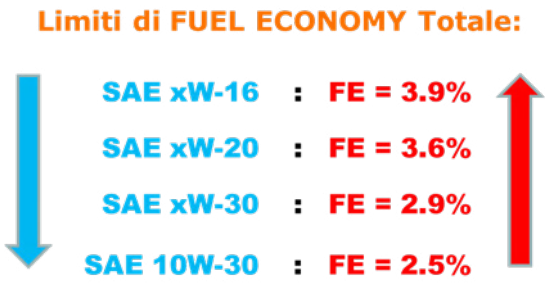


Esistono diversi fattori che influenzano il fenomeno ed uno di questi è l'olio lubrificante: una adeguata formulazione dell'olio può pertanto minimizzare il fenomeno. È stato infatti rilevato che gli

additivi al Ca usati come detergenti risultano favorire il fenomeno significativamente di più rispetto agli additivi al Mg che svolgono la stessa funzione. Ci sono invece seri indizi che portano a ritenere come la presenza degli antiossidanti nell'olio contrasti il fenomeno.

LE NUOVE SPECIFICHE INTERNAZIONALI

Le nuove specifiche sono nate con l'obiettivo principale di migliorare la fuel economy in vista dei futuri limiti sulla CO_2 che saranno imposti alle flotte autoveicolari. È stata introdotta in Europa nel dicembre 2016 la specifica ACEA C5 che abbassa a 2.6 cP il limite minimo di viscosità HTHS che dovrebbe aiutare nel raggiungimento del limite minimo di fuel economy del 3% (rispetto ad un olio tradizionale SAE 15W-40) alla prova motoristica su motore Mercedes M111. La specifica ACEA C5 è servita come base ad alcuni costruttori (BMW, Mercedes) per elaborare proprie specifiche (BMW LL-17FE plus e MB 229.71) che aggiungono all'unica prova di fuel economy prevista dalla ACEA nuove prove su motorizzazioni di diverso tipo. In campo internazionale le specifiche di riferimento sugli oli con caratteristiche fuel economy sono emanate dall'associazione nippo-americana ILSAC: la attuale specifica ILSAC GF-5 verrà rimpiazzata, tra il 2019 ed il 2020, dalla nuova specifica ILSAC GF-6 che imporrà limiti variabili a seconda del grado SAE :



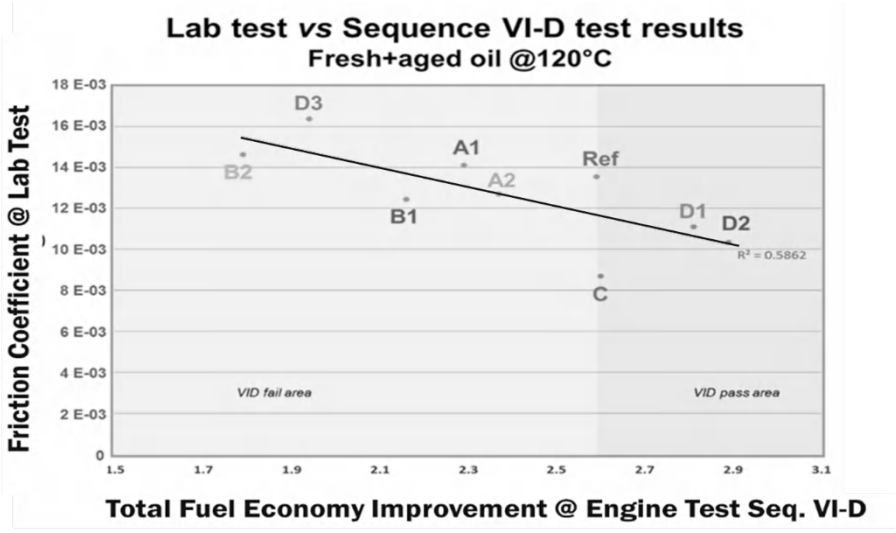
Le nuove specifiche non possono prescindere dalle problematiche motoristiche emergenti come la LSPI. Sono state infatti sviluppate diverse prove motoristiche per valutare le prestazioni dell'olio nei confronti di questo fenomeno. La prima nata è la prova su motore Ford Ecoboost, che ha generato l'upgrade da ILSAC GF-5 a ILSAC GF-5 "plus"; più di recente sono state messe a punto altre prove con la stessa finalità ma su motori di diversi costruttori (GM, Mercedes e Peugeot) poi inserite nelle rispettive specifiche. In ambito ACEA alle attuali specifiche "C" si affiancheranno nei prossimi anni le nuove specifiche "G" che creeranno un ponte tra ACEA e ILSAC prevedendo l'effettuazione sia di prove motoristiche europee che americane.

STATO DELL'ARTE IN ENI

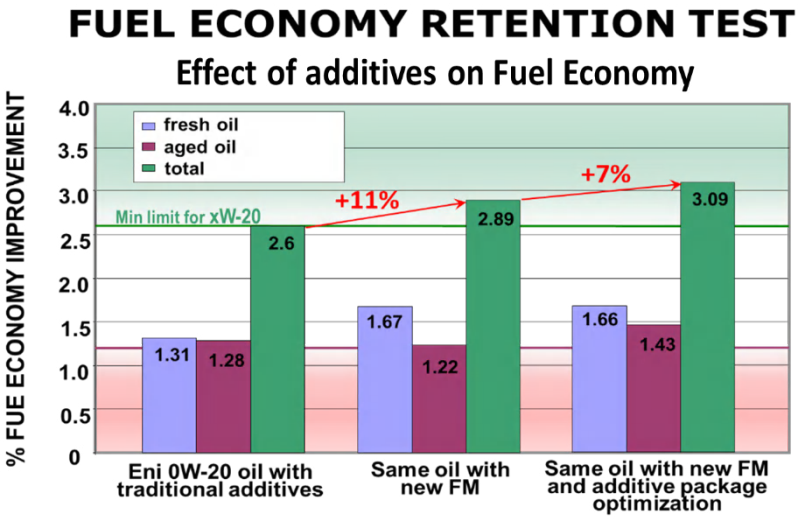
È stata messa a punto in Eni una prova di laboratorio per la valutazione prestazionale di additivi modificatori di attrito in grado di correlare con la prova motoristica "Fuel economy retention" prevista nelle specifiche ILSAC GF-5.

La prova fa uso di un tribometro per la valutazione delle prestazioni antifriction degli oli e di un

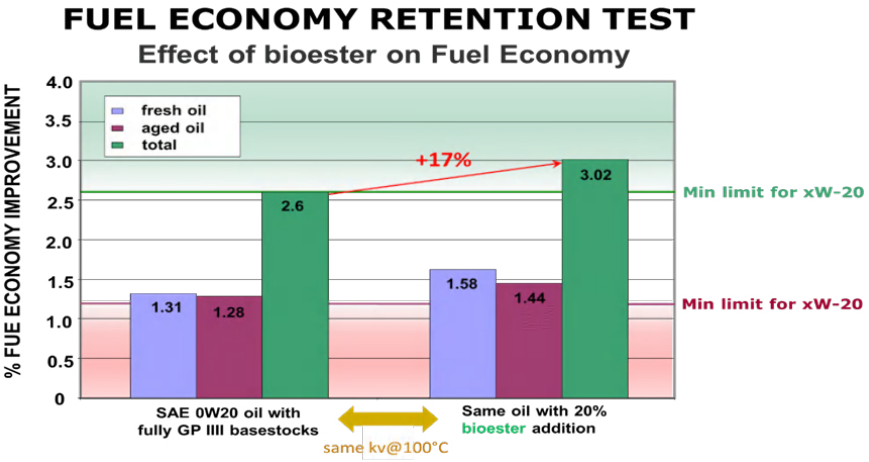
test che simula l'invecchiamento dell'olio tramite ossidazione per consentire la valutazione tribologica sull'olio usato oltre che sull'olio nuovo. Ciò consente la correlazione tra i risultati tribologici e quelli della prova motoristica di "fuel economy retention" che valuta la prestazione sull'olio sia dopo 16 ore di condizionamento che dopo 100 ore di invecchiamento.
La prova di laboratorio è stata impiegata per valutare le prestazioni di un olio di riferimento eni SAE 0W-20, di livello prestazionale ILSAC GF-5, ed 8 oli sperimentali caratterizzati dalla presenza di antifriction diversi. Gli stessi prodotti sono stati anche valutati alla prova motoristica di "fuel economy retention" consentendo così di esprimere la correlazione riportata nella seguente figura:



La nuova metodologia di prova può essere considerata come un valido strumento di screening, dal punto di vista delle prestazioni antifriction, per l'identificazione di nuovi componenti essendo in grado di fornire indicazioni utili pur senza il ricorso alle costose prove motoristiche.
Tra gli oli valutati è stata identificata una categoria di additivi antifriction emersa come molto promettente (quella relativa agli oli D1 e D2) in vista del raggiungimento dei sempre più severi limiti di fuel economy imposti dalle nuove specifiche.
Il ruolo di un additivo con alte prestazioni pro fuel economy può essere rafforzato lavorando sul contesto formulativo nel quale l'additivo viene inserito. Nella figura successiva si esprime il miglioramento ottenuto alla prova motoristica con l'impiego di un nuovo additivo antifriction in luogo di uno di precedente generazione. Successivamente è stato anche ottimizzato il contesto formulativo ottenendo un ulteriore vantaggio in termini di fuel economy.



Anche l'impiego di basi esteree con elevata polarità può avere un ruolo significativo nel miglioramento della fuel economy, come dimostra il risultato espresso nel grafico successivo:

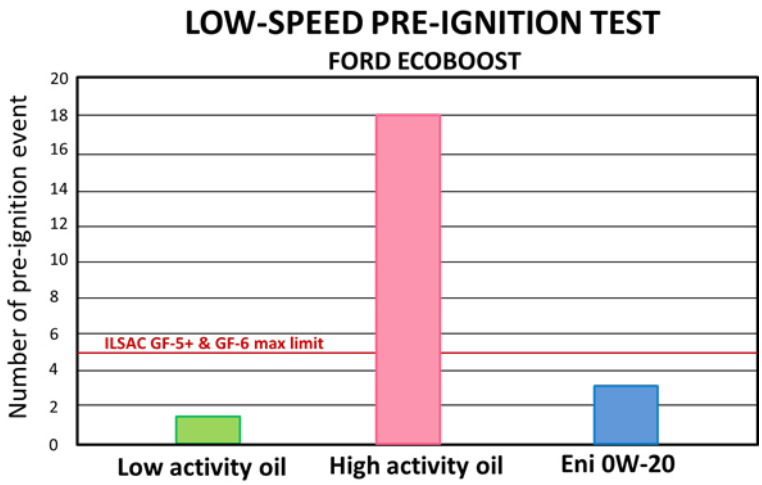


Tale risultato è servito da spunto per l'impiego dell'estere TMP-PA di Matrìca in un olio ad elevata fuel economy qualificato ILSAC GF-5 ed ora commercializzato come i-sint 0W-20 biotech.
L'essere riusciti ad identificare un nuovo additivo friction modifier e l'aver ottimizzato il contesto formulativo in cui lo stesso additivo lavora ha consentito di ottenere ottimi risultati anche nelle prove motoristiche Mercedes: la specifica Mercedes Benz 229.71 prevede l'effettuazione di ben 5 prove di valutazione della fuel economy su motori diversi (tre a benzina e due Diesel). Nella tabella successiva si riporta per ogni motore il risultato di fuel economy percentuale espresso rispetto ad un olio di riferimento ed il relativo limite imposto da Mercedes: si osserva che il risultato da noi

raggiunto è ben superiore al limite previsto, il che rappresenta la conferma dei buoni risultati raggiunti da Eni sulla via della riduzione della CO_2.

MB FE TESTS	229.71 limit	Eni AA1AB69
M111 FE	>3.0%	4.04%
M271 FE	>1.0%	2.50%
OM651 FE	>1.7%	3.63%
OM642 FE	>2.7%	4.10%
M272 FE	>0.8%	1.32%

Il nuovo olio contiene il meglio della nostra tecnologia di additivazione, come il nuovo detergente calixarenico S-free, il disperdente chlorine-free XD23 ed un nuovo antifriction ashless sviluppato con Huntsman.
Un olio SAE 0W-20 con lo stesso "core" di additivazione è stato valutato anche alla nuova prova motoristica LSPI su motore Ford ecoboost ove ha manifestato un numero di episodi di preaccensione molto contenuto e di poco superiore all'olio di riferimento a bassa attività, e comunque ben dentro il limite stabilito dalla ILSAC.



I nuovi oli SAE 0W-20 qualificato ACEA C5 (e presto anche MB229.71) e SAE 0W-20 upgradato da ILSAC GF-5 a GF-5 "plus" verranno presto messi a disposizione dell'unità commerciale per essere proposti rispettivamente sul mercato europeo e su quello internazionale come oli ad elevata fuel economy in grado di soddisfare i più moderni requisiti prestazionali delle specifiche più recenti.

PROGRAMMA DI SVILUPPO NUOVI PRODOTTI

Partendo dalle esperienze acquisite nella formulazione degli oli SAE 0W-20 ACEA C5 e ILSAC GF-5 plus, e del lavoro di ricerca su nuovi additivi antifriction, con l'impiego della procedura di valutazione interna, Eni si impegnerà nella formulazione di oli corrispondenti alle future specifiche ILSAC GF-6 ed ACEA G6 & G7 che dovranno coprire le richieste di massima fuel economy da parte dei costruttori per i prossimi anni. Nello sviluppo di tali prodotti si cercherà di massimizzare l'impiego di additivi di tecnologia interna favorendo così l'offerta sul mercato di formule originali e proprietarie che rendano i nostri prodotti diversi da quelli dei concorrenti sia per prestazioni che per caratteristiche composizionali.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

Le risorse necessarie allo svolgimento dell'attività prevista per i prossimi tre anni, con sviluppo e qualificazione di oli lubrificanti ad elevata fuel economy adatti alle nuove motorizzazioni automobilistiche, sono di circa 4 milioni di euro.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 13

CARBURANTI INNOVATIVI PER RIDUZIONE CO_2

La sfida per tutto il settore dei trasporti, è garantire la mobilità al maggior numero di persone contribuendo alla lotta al cambiamento climatico. Una sfida che si può vincere solo cambiando l'attuale mix energetico.

I target dovranno essere ottenuti con l'individuazione di un mix energetico realistico ed economicamente sostenibile, atto a garantire la sostituzione graduale delle fonti ad alto contenuto di carbonio con quelle più basse emissioni di gas serra. In questo nuovo sistema, che ha preso comunemente il nome di "transizione energetica", il ruolo del gas naturale sarà fondamentale sia come fonte primaria per la produzione di energia elettrica sia come combustibile da usare direttamente nei trasporti.

Un'altra filiera importante per la transizione energetica è la valorizzazione delle fonti rinnovabili che consentono di essere trasformati in combustibili attraverso un processo di trasformazione energetica circolare. In questo ambito si ritiene fondamentale il processo di idrogenazione delle fonti rinnovabili (Hydroteated Vegetable Oli) in quanto consente una adeguata flessibilità nella gestione delle cariche, e fungendo da "green refinery" trasforma le fonti rinnovabili in GPL, benzina leggera, gasolio e kerosene a basso contenuto di carbonio.

Infine la cattura della CO_2 e la sua riconversione in combustibile a basso tenore di carbonio o come carica per la produzione di e-fuel (utilizzo di energia rinnovabile es. solare ed eolico) o anche fuel tradizionali, completa il quadro di un'economia energetica circolare applicata ai combustibili autotrazione.

In proiezione, le attuali raffinerie, trasformate in hub energetici, saranno in grado di produrre carburanti e combustibili processando:

- CO_2 catturata dalla combustione
- materia grezza derivante da scarti di lavorazione, da rifiuti o da altre fonti rinnovabili, non in competizione con il cibo,
- petrolio, lavorato con energie alternative quali eolico o solare,
- cariche a basso contenuto di carbonio.

Il gas naturale si caratterizza per un'ampia disponibilità nel mondo. Secondo recenti dati a livello internazionale[32] le risorse recuperabili di gas naturale sono valutate in circa 203 mila milioni di m^3. Le previsioni dell'AIE[33] nello scenario di lungo termine al 2040 vedono il peso del gas sui consumi mondiali di energia primaria passare dall'attuale 22% al 25%; tra le fonti fossili il metano avrà

32 Eni - World Gas and Renewables Review 2017 – Volume 2

33 IEA – Outlook for Natural Gas – Excerpt from World Energy Outlook 2017

una crescita di consumi pari al 1,6% annuo. A livello europeo la domanda di gas potrebbe rimanere stagnante.

Sia che venga utilizzato in alternativa o sostituzione dei combustibili fossili a maggior intensità carbonica, sia che venga impiegato per l'affidabile capacità di produzione elettrica, in combinazione con le fonti rinnovabili, il gas naturale rappresenta quindi un'importante soluzione nel processo di graduale de-carbonizzazione del settore energetico. Grazie alle sue valenze ambientali, alla sua abbondanza e flessibilità, il metano rappresenta una strada plausibile per il perseguimento degli ambiziosi obiettivi di abbattimento delle emissioni, lasciando aperte diverse opzioni tecnologiche e di policy.

Il gas naturale, tra le fonti fossili, è quello che contiene meno carbonio, ovvero la sua composizione ha il rapporto carbonio/idrogeno più basso, seguito da petrolio e carbone. Per questo motivo la tecnologia che consente di utilizzare il metano nella sua forma liquida (GNL Gas Naturale Liquefatto) è apprezzata dal settore del trasporto pesante in quanto consente un'alta efficienza del motore associata ad una riduzione delle emissioni di CO_2. I dati riportati dal progetto Blucorridor indicano, per un percorso di guida reale, riduzioni delle emissioni del 5% di CO_2, del 95% del particolato e del 35% NOX in confronto ad una qualità tipica del gasolio disponibile in Europa.

La tecnologia dei veicoli oggi disponibile in Europa è la seguente. I camion alimentati a GNL rispetto a quelli a gasolio si caratterizzano, come ricordato prima, per minori emissioni e maggiore silenziosità; i motori GNL ad iniezione diretta hanno un alto potenziale di sviluppo grazie ad un'efficienza superiore del motore e alla conseguente riduzione delle emissioni di CO_2; Scania ha recentemente presentato un camion da 460 CV con autonomia di 1.000 km e prestazioni pari ai veicoli gasolio; Volvo ha in fase di omologazione un mezzo dual fuel Diesel (5%) e GNL (95%) a iniezione diretta 2.0 HPDI (High Pressure Direct Injection) con 460 CV di potenza.

Il metano è quindi un ottimo combustibile a basso contenuto di carbonio e può essere già da subito utilizzato sia in veicoli per il trasporto privato che su quelli per il trasporto pubblico e per le merci. Esistono infatti in commercio veicoli in grado di utilizzare il metano, sia già omologati dalle case costruttrici, che adattati da autofficine autorizzate in grado di convertire veicoli monofuel a combustione interna in veicoli bi-fuel, mediante parti di ricambio disponibili aftermarket. La rete di metano esistente consente poi di utilizzare già da subito in ambito autotrazione il bio metano, che in Italia consente di ottenere crediti come fuel advanced.

Il Governo italiano al fine di incentivare l'utilizzo di fonti rinnovabili avanzate non in competizione con le coltivazioni di cibo, ha anticipato dei limiti europei obbligando l'uso di quote, su base energetica, nel settore dei trasporti di questi carburanti avanzati.

Il bio metano è stato riconosciuto come carburante di livello avanzato per i trasporti pertanto i fornitori di carburanti, acquistando ed immettendo sul mercato autotrazione del biometano, otterranno dei crediti. Questi crediti certificati consentiranno al Governo di verificare chi ha rispettato l'immissione al consumo delle quote previste dal Decreto Ministeriale.

Tale decreto prevede che al 2018 1,2% di energia rinnovabile, usata nei trasporti, derivi da prodotti avanzati, nel 2019 la quota sarà del 1,2%, nel 2020 e 2021 del 1,6% e nel 2022 del 2%.

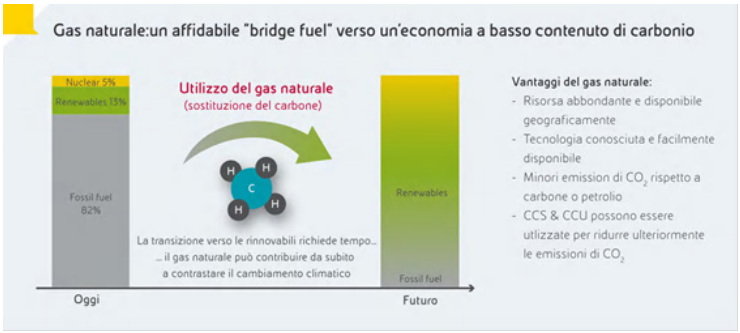


FIGURA 1 IL METANO COME FONTE A BASSO CONTENUTO DI CARBONIO PER LA TRANSIZIONE ENERGETICA

Sempre nell'ottica di massimizzare l'utilizzo del gas naturale, è di interesse individuare nuove metodologie per favorire una sua maggiore penetrazione nel mercato energetico. La trasformazione del metano in un vettore energetico liquido, a temperatura e pressione ambiente, è un'opzione attraente, anche grazie alle più favorevoli condizioni di trasporto e stoccaggio.
Tra i diversi vettori energetici liquidi ottenibili dal metano, il metanolo è oggi il più interessante poiché trova ampie applicazioni nell'industria chimica ed energetica, con un mercato in continua crescita nel 2016 il mercato di metanolo aveva una produzione pari a 76 milioni di tonnellate l'anno e si prevede raggiunga i 99 milioni di tonnellate anno al 2022[34].
L'aspetto più interessante del mercato del metanolo è legato al suo utilizzo nel settore energetico come carburante. Il metanolo è già usato da diversi decenni come carburante per motori a combustione interna, ad esempio in miscela con la benzina a diverse percentuali, le più comuni al 15% (M15) e all'85% (M85). I possibili utilizzi del metanolo nelle benzine sono:

- Metanolo componente alto ottanico in benzine (M3, M15, M20)
- Metanolo M85
- Metanolo in miscela ternaria con etanolo e benzina (GEM)
- Metanolo come singolo componente M100 in motori benzina e Diesel
- Metanolo in MTBE
- Metanolo in fuel cell.

L'utilizzo del metanolo in motori a combustione interna offre potenzialità interessanti per la riduzione dei principali inquinanti e per la riduzione dei GHG, cioè i gas a effetto serra. Un'espansione delle possibilità di utilizzo di metanolo nel settore energetico porterebbe a una crescita consistente della sua domanda nel mercato.
Nell'industria chimica il metanolo viene impiegato per la preparazione della formaldeide, dell'acido acetico, di etilene/propilene mediante i processi MTO (da metanolo a olefine, Methanol to Olefins); quest'ultime si possono considerare come "molecole piattaforma" per la produzione di polimeri essenziali come il polietilene a bassa e ad alta densità, il polipropilene e altri intermedi. Nel set-

34 EMT - http://www.expertmarketresearch.com/pressrelease/global-methanol-market - Posted on 31 Jan 2017

tore energetico il metanolo trova inoltre applicazione nella preparazione dell'MTBE (metil-ter-butil etere), del FAME (Fatty Acid Methyl Ester), e del DME (dimetil etere).

Il DME è un prodotto simile al GPL e può essere utilizzato come combustibile per motori diesel sia per trazione su strada sia nel trasporto marittimo.

Considerando una visione di lungo termine in cui il mix energetico sarà a contenuto prevalentemente rinnovabile e concentrato soprattutto sulla produzione di energia elettrica, il metanolo offrirebbe la possibilità di immagazzinare i surplus di energia elettrica generata durante i picchi di produzione da fonte eolica o solare e non assorbita dalla rete.

Una delle opzioni più interessanti è la produzione di metanolo da CO_2 sfruttando l'energia rinnovabile non utilizzabile altrimenti. Questa energia è, infatti, immagazzinata nel legame chimico che si costituisce nella reazione che genera il metanolo e può quindi essere stoccata, trasportata e riconvertita, quando necessario, sfruttando le infrastrutture, come pure i veicoli, tipiche del mercato dei combustibili liquidi. In questo modo è possibile immaginare la realizzazione di un'economia circolare come ipotizzato dal premio Nobel G.A. Olah[35] e come è schematizzato nella seguente

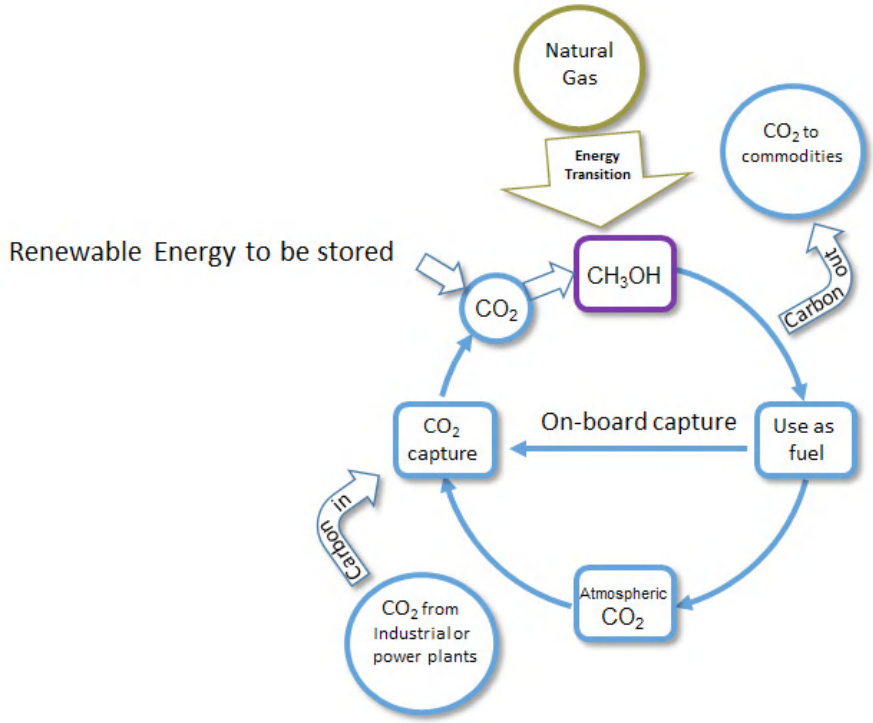


FIGURA 2 – ESEMPIO DI ECONOMIA CIRCOLARE DEL METANOLO

35 George A. Olah (Author), Alain Goeppert (Author), G. K. Surya Prakash (Author). "Beyond Oil and Gas: The Methanol Economy". - Wiley-VCH; 3 edition (September 4, 2018) - ISBN-13: 978-3527338030; ISBN-10: 3527338039

Infatti il metanolo dopo l'utilizzo nel motore, si ritrasforma in anidride carbonica che viene riimmessa nell'atmosfera ma che potrebbe essere recuperata, ad esempio anche on-board, sulle autovetture e ritrasformata in metanolo sfruttando l'energia elettrica solare o eolica.
L'altro prodotto interessante da considerare come prodotto a basso contenuto di carbonio è hydrogenated vegetable oil (HVO). Questo prodotto ha il doppio vantaggio: di essere completamente rinnovabile e di ridurre il contenuto di carbonio del gasolio fossile se usato come componente blending. Il fatto di essere completamente compatibile con il gasolio e poter essere miscelato come componente blending, in qualsiasi proporzione, lo rende vantaggioso rispetto al FAME, che invece può essere utilizzato in miscela solo fino al 7% (fino al 30% per veicoli ad uso captivo). Il vantaggio del HVO si potrebbe sfruttare al massimo se venisse utilizzato puro, eseguendo alcuni accorgimenti sui veicoli ad alimentazione Diesel. In questo caso il prodotto sarebbe completamente rinnovabile, alimenterebbe un motore a combustione interna, che rispetto agli altri ha il maggior rendimento, e rispetto al FAME avrebbe un contenuto energetico più elevato. Quindi HVO, prodotto paraffinico ad alto contenuto energetico e a basso contenuto di carbonio, rispetto ad un gasolio minerale, privo di aromatici e zolfo, è l'ideale per una transizione low carbon fuel (con i parametri della RED I la riduzione della CO_2 rispetto ad un combustibile minerale utilizzato nello stesso motore sarebbe di circa il 60%). Il processo di idrogenazione delle cariche potrebbe poi in futuro essere fatto da idrogeno (es. idrolisi) prodotto da energia elettrica rinnovabile.
Si potrebbe avere un combustibile per motore Diesel completamente rinnovabile con le emissioni derivanti dalla combustione allo scarico quali HC, CO, NOX e PM notevolmente migliorate rispetto ad un gasolio tradizionale.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Da diversi anni molte delle misure di politica energetica e ambientale dell'Unione Europea sono finalizzate a un progressivo abbattimento delle emissioni di gas a effetto serra, con obiettivi via via più ambiziosi. L'accordo quadro dell'ottobre 2014 su clima ed energia per il 2030 è stato fissato in coerenza con una roadmap (2011) che prospetta un'economia competitiva "low carbon" entro il 2050. L'obiettivo, di mantenere l'aumento della temperatura globale entro il limite di 2°C, è ampiamente accettato e ora, in seguito alla COP 21 di Parigi, largamente approvato. Tale obiettivo dovrà al contempo garantire sicurezza energetica, equità energetica e sostenibilità ambientale.
Pertanto tutto il settore della lavorazione del petrolio è impegnato a reinventarsi per assicurarsi l'accesso ad un'energia sostenibile e contrastare il cambiamento climatico. Per questo occorre un approccio integrato al modello di business che apra la strada verso un futuro low-carbon e per fare questo, durante il periodo di transizione, si dovrà predisporre un portafoglio di progetti a basso potenziale di emissioni di CO_2 e incoraggiare l'uso del gas naturale, sia per la generazione di energia elettrica che per il trasporto. Sarà inoltre necessario incentivare lo sviluppo delle fonti rinnovabili e stimolandone la ricerca tecnologica.
Lo sviluppo e l'utilizzo di prodotti a basso contenuto di carbonio in ambito del trasporto consentono da subito di migliorare l'efficienza dei motori ed al tempo stesso di ridurre le emissioni in ambito locale.

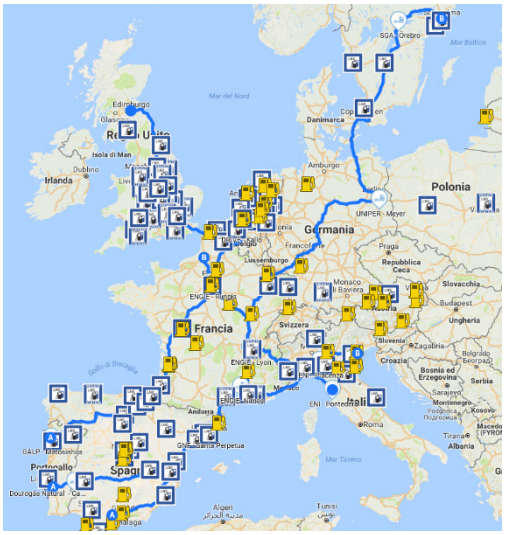


FIGURA 3 STAZIONI DI SERVIZIO GNL SU DIRETTRICI BLUE CORRIDORS (HTTP://LNGBC.EU/)

In linea con questi obiettivi la UE ha reso più stringenti i limiti sulle emissioni di CO_2 sulle vetture private ed ha introdotto dei limiti sulle emissioni di CO_2 per i camion e gli autobus. Nel caso del trasporto pesante è stato incentivato l'utilizzo del gas naturale liquefatto (GNL) attraverso il progetto Blue Corridors, creando delle linee preferenziali per il trasporto dove è possibile trovare il GNL. Per garantire la disponibilità e la migliore qualità di gas naturale liquido, in aggiunta alla disponibilità di metano da fonti biologiche, occorre studiare sia le tecnologie che la qualità dei prodotti.

La ricerca deve essere inoltre orientata a sviluppare tecnologie per sfruttare le fonti rinnovabili da materia prima di seconda e terza generazione, provenienti cioè dall'utilizzo di parti di scarto della cellulosa e della lignina, o da altre colture quali le alghe. Queste devono essere correlate allo sviluppo di tecnologie di processo e nuove tecnologie di blending o produzione di carburanti e combustibili con un basso contenuto di carbonio.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

In Italia, l'uso del gas naturale nel trasporto si è significativamente diffuso negli ultimi anni, superando il miliardo di metri cubi. La letteratura scientifica evidenzia come i motori appositamente pensati per l'alimentazione a gas possono ridurre le emissioni, a parità di potenza generata, del 20-25% rispetto ai tradizionali carburanti fossili; è questa una possibile base di partenza per la transizione verso combustibili a basso contenuto di carbonio. Il metano può contribuire a diminuire le emissioni sia nella mobilità urbana, come gas naturale compresso (GNC), che nel trasporto pesante su gomma e marittimo sotto forma di gas naturale liquefatto (GNL). Ciò in coerenza con la Direttiva per lo sviluppo dei carburanti alternativi (2014/94/UE) e con il conseguente piano strategico italiano per la diffusione del GNL nei trasporti, lanciato dal Ministero dello Sviluppo

Economico. Il Governo intende adottare iniziative per la realizzazione di centri di stoccaggio e norme per la realizzazione di distributori di GNL in tutto il territorio nazionale al fine di "ridurre l'impatto ambientale dei motori diesel nel trasporto via mare e su strada".
Il mercato trazione del GNL è ormai ben avviato in tutta Europa Occidentale con forti prospettive di sviluppo: nel 2017 si contano 101 Stazioni di Servizio e circa 1.000 camion in grado di utilizzarle con un incremento del 350% in confronto al 2013. Le previsioni al 2030 prevedono che il mercato avrà a disposizione 1.100 Stazioni di Servizio e circa 400.000 camion circolanti.

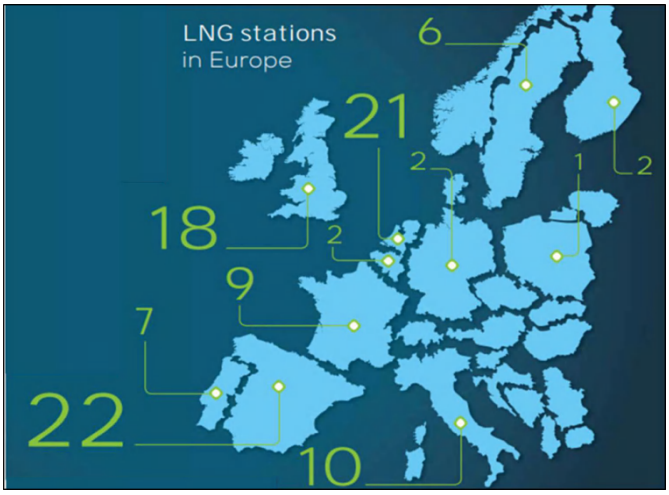


FIGURA 4 NUMERO DI STAZIONI DI SERVIZIO GNL PRESENTI NEI VARI PAESI UE (DATI NGVA BLUE CORRIDORS)

In Italia nel 1982, ai tempi della prima crisi del Golfo, il CNR ha svolto un'attività di ricerca con una benzina al 20% di metanolo che mediante l'utilizzo di co-solventi ha reso il fuel idoneo per l'uso in veicoli; a quei tempi si erano resi necessari modifiche agli elastomeri e l'aggiustamento della carburazione[36]. Attualmente Eni e FCA hanno in corso una sperimentazione su 5 veicoli della flotta Enjoy che sono alimentati con una formulazione di benzina contenente il 15% di metanolo.
In Europa, il metanolo è consentito fino al massimo del 3% v/v nella benzina (specifica EN228), in UK assieme a Etanolo sono usate piccole quantità di bio-metanolo in linea con la specifica Europea.
Nel 2015 la Danimarca ha aperto la prima stazione di servizio di metanolo per fuel cell. Nel 2016 in Islanda è stata inaugurata una sperimentazione di 12 mesi con 6 veicoli Geely (Cina) alimentati con metanolo rinnovabile prodotto da Vulcanol di Carbon Recycling International (Produzione totale di circa 4000 t/y).
In Israele è in corso un trial con benzine M15 in collaborazione con FCA (Fiat Chrysler Automobiles).
Negli Stati Uniti la specifica ASTM D4814-10° prevede l'uso di metanolo fino al 2,75 % v/v con un vo-

36 CNR-Progetto Finalizzato Energetica - Libro Bianco 11 – Uso del metanolo per autotrazione – Dicembre 1982

lume uguale di butanolo, mentre la norma ASTM D5797-16 consente l'utilizzo di miscele metanolo benzina da M51 a M85. EPA prevede un massimo del 5% v/v di metanolo, con un minimo di 2,5 % v/v di co-solventi (uno o più alcoli superiori come etanolo, propanolo, butanoli e pentanoli).
In Cina, esiste una norma nazionale che consente di utilizzare metano solo al 85 % v/v in benzina, come carburante per motori (Green Car Advisor 2009). Inoltre, diverse province cinesi consentono l'uso di metanolo in varie miscele con benzina dal 5% al 100%, mentre è in corso di discussione uno standard nazionale per un combustibile con il 15% di metanolo - M15.
In Australia è in corso un trial che utilizza metanolo in miscela con benzina ed etanolo (GEM).
In Europa le principali Oil Company hanno inoltre fondato l'associazione Oil and Gas Climate Initiative (OGCI) che ha l'obiettivo di finanziare le migliori tecnologie a basse emissioni di CO_2 e definire azioni concrete per ridurre le emissioni di gas serra.
L'iniziativa è diretta dai CEO di dieci compagnie Oil&Gas che intendono guidare la risposta dell'industria ai cambiamenti climatici. Le aziende che compongono OGCI - BP, CNPC, Eni, Pemex, Reliance Industries, Repsol, Royal Dutch Shell, Saudi Aramco, Statoil e Total - insieme rappresentano un quinto della produzione di petrolio e gas del mondo.
L'OGCI è stata istituita a valle della discussione tenutasi in occasione del World Economic Forum Annual Meeting del 2014, ed è stata lanciata ufficialmente al vertice sul clima convocato dal Segretario Generale delle Nazioni Unite a New York nel settembre 2014.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

Le risorse stimate per lo sviluppo di prodotti a basso impatto ambientale da un punto di vista tecnologico sono di circa 60 milioni di euro, molto maggiori i costi delle eventuali infrastrutture necessarie.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 14

MATERIALI ELASTOMERICI PER PNEUMATUCI ENERGY-SAVING

Gli pneumatici sono tra i componenti decisivi per una performance buona ed efficiente degli autoveicoli. Negli ultimi anni, in tal senso, è cresciuta la comprensione tecnico-scientifica degli specialisti di settore e la consapevolezza da parte dell'opinione pubblica e dei vari livelli legislativi.

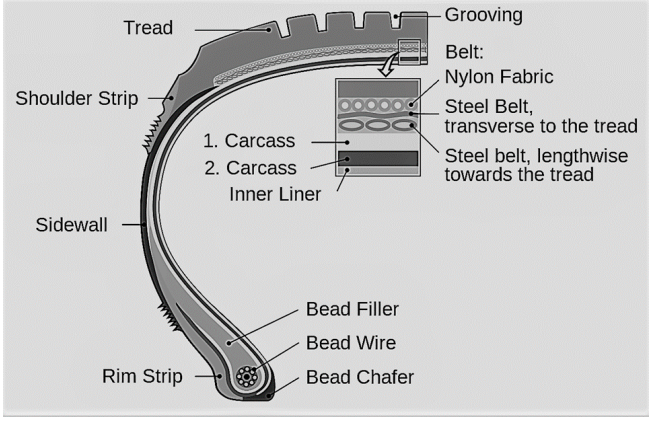


FIGURA 1: STRUTTURA SCHEMATICA DI UN MODERNO PNEUMATICO

Lo pneumatico è una struttura molto complessa (cfr. figura 1), costituita da più strati di diversi materiali che danno al manufatto finale le caratteristiche e le prestazioni desiderate. Un ruolo particolarmente decisivo è svolto dallo strato più esterno (battistrada, spalla e fianco) che è costituito da mescole di elastomeri in cui sono stati dispersi additivi e cariche e successivamente vulcanizzati. Le proprietà fisico-meccaniche della mescola a base elastomerica (a diretto contatto con l'asfalto) hanno molta importanza per tre aspetti fondamentali: la durata dello pneumatico, la sua sicurezza in termini di tenuta di strada in varie condizioni ambientali, il consumo di carburante dell'autoveicolo. Mentre i primi due punti sono intuitivamente noti a tutti, anche non specialisti, non altrettanto si può dire del terzo. Di fatto una percentuale rilevante del consumo complessivo di carburante (tra il 15% e il 35% a seconda dei casi) è dissipato nei fenomeni di attrito tra l'asfalto e la mescola elastomerica dello strato esterno. Nella letteratura tecnica la forza di attrito in questione è chiamata Rolling Resistance (RR) ed è spesso utile esprimerla in forma adimensionale dividendola per la forza peso esercitata dall'autoveicolo sullo pneumatico. In estrema sintesi tanto più alto è il valore dell'indice di RR tanto maggiore sarà il consumo di carburante dell'automezzo.

Nel corso degli anni la struttura costruttiva e i materiali utilizzati per gli pneumatici si sono molto evoluti e, tra i benefici conseguenti, si è avuta una consistente e progressiva riduzione della RR. In base ad alcune serie storiche di dati, ad esempio, si può stimare che si sia ottenuto un dimezzamento della RR nell'arco dei due decenni compresi tra il 1980 e il 2000.

Ovviamente, come ci si può attendere anche intuitivamente, la quantità di energia dissipata per attrito da un veicolo durante la marcia dipende da molti fattori complessi ed eterogenei: lo pneumatico, le caratteristiche del manto stradale, la tipologia di percorso, le condizioni climatiche ed ambientali, lo stile di guida.

Il test con la prova finale su strada di un nuovo pneumatico è molto oneroso, in termini sia di tempo sia di risorse economiche. È chiaro che non è utilizzabile questo tipo di test quando sì è nella fase di sviluppo nuovi materiali in cui occorre provare numerose formulazioni diverse. È necessario quindi avere analisi su scala di laboratorio che consentano di effettuare uno screening preliminare con tempi e costi ragionevoli. Nel corso degli anni si è studiata in modo approfondito la viscoelasticità degli elastomeri e delle loro mescole. Alcuni dati che si ottengono da queste misure di laboratorio hanno dimostrato una buona capacità predittiva delle caratteristiche finali del manufatto, e tra queste anche la RR.

La viscoelasticità studia e misura nei materiali, sottoposti ad una certa deformazione, il contributo distinto dei processi di dissipazione viscosa e di quelli di immagazzinamento di energia elastica. Un metodo consolidato consiste nel sottoporre il campione ad una deformazione sinusoidale nel tempo, con frequenza ω. Nella prova viene misurato il corrispondente sforzo, che sarà pure sinusoidale, con la stessa frequenza ω della deformazione ma sfasato di un certo angolo Δ. L'angolo Δ è 0° nel caso dei solidi elastici e invece 90° per i liquidi viscosi. Tutti i valori intermedi sono rappresentativi del comportamento viscoelastico; la tangente dell'angolo Δ è proporzionale al rapporto tra l'energia viscosa dissipata ed energia elastica immagazzinata. Si è osservato che il valore di tan Δ, misurato in specifiche condizioni di temperatura, frequenza e deformazione, è un buon indicatore predittivo della RR .

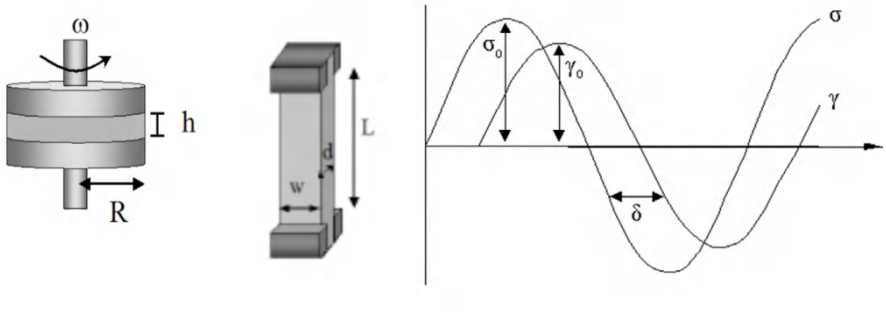


FIGURA 2: A SINISTRA ALCUNE POSSIBILI GEOMETRIE USATE PER LE MISURE OSCILLATORIE; A DESTRA L'ANDAMENTO SINUSOIDALE IN FUNZIONE DEL TEMPO PER LA DEFORMAZIONE (Γ) E LO STRESS (Σ) E IL RELATIVO ANGOLO DI SFASAMENTO Δ

La mescola finale che si utilizza per la produzione di uno pneumatico è costituita da una formulazione molto articolata e complessa che si può riassumere sinteticamente come segue:

- Una base costituita da un polimero elastomerico (o un blend di più elastomeri)
- Additivi per proteggere la gomma da fenomeni ossidativi
- Plastificanti per favorire la processabilità della gomma, abbassandone la viscosità
- Cariche rigide rinforzanti quali carbon black, silici, caolino, carbonati;
- Vulcanizzanti e regolatori del processo di vulcanizzazione;
- Additivi vari quali coloranti, distaccanti, disperdenti, ecc.;

È da sottolineare che spesso il peso o il volume complessivo di additivi-cariche può essere superiore a quello del polimero base. È logico dunque attendersi che ci sia un forte effetto sulle proprietà finali (tra cui la RR) degli additivi-cariche impiegati e del loro stato di dispersione.
Altrettanto importante, anche se forse meno nota, è la rilevanza per le proprietà finali delle caratteristiche dei polimeri utilizzati come base. Tra queste vanno evidenziate:

- Composizione e struttura chimica (tipo e configurazione dei monomeri costituenti la catena polimerica)
- Distribuzione dei pesi molecolari
- Struttura delle catene: lineare, ramificata, a stella
- Presenza di eventuali gruppi funzionali

La combinazione di tutte queste caratteristiche strutturali dei polimeri di base ha una influenza diretta sul comportamento viscoelastico in fase di miscelazione con cariche e additivi e di conseguenza anche sul loro stato finale di dispersione e di adesione alla matrice elastomerica.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Per le industrie produttrici di gomme sintetiche ci sono vari fattori che tuttora stimolano la prosecuzione della ricerca volta a migliorare i materiali destinati al settore pneumatici, con particolare riferimento al risparmio carburante.

Volumi di mercato

Attualmente su scala mondiale si producono quasi 20 milioni di tonnellate annue di elastomeri sintetici. Circa il 70% di questi volumi trova applicazione nel settore automobilistico, per il quale la grande maggioranza dei consumi è rappresentato appunto dagli pneumatici[37].
A livello di Unione Europea il mercato delle gomme sintetiche è di 2,5 milioni di tonnellate annue (a fronte di 1,2 milioni di tonnellate di gomma naturale) di cui il 50% circa destinato al settore pneumatici[38].
L'industria italiana si posiziona all'interno dei primi cinque produttori europei con una capacità installata vicina alle 600 mila tonnellate annue.

37 http://indiarubbermeet.in/uploads_2016/topmenu/talk4_20160312095802.pdf
38 http://www.etrma.org/uploads/Modules/Documentsmanager/20161208---statistics-booklet-2016-final5.pdf

Risparmio energetico

Il trasporto stradale rappresenta uno dei fattori dominanti per le emissioni di CO_2 dovute all'utilizzo dei combustili fossili. Tale contributo è stimato essere circa il 25% del totale su scala europea[39].

È addirittura sorprendente l'effetto dell'attrito tra pneumatico e manto stradale che è all'origine del 20-30% del consumo totale di carburante di un autoveicolo[40] Risulta quindi evidente che anche un piccolo miglioramento in termini di riduzione della RR comporta un apprezzabile beneficio sulle emissioni dovute alla combustione di fonti fossili.

Benefici per sicurezza e salute

La ricerca e sviluppo sui polimeri base e le formulazioni delle mescole risulta fondamentale anche per migliorare altri aspetti legati all'intero ciclo di vita quali ad esempio

- La sicurezza in fase di guida aumentando il grip (la presa) su superfici bagnate o gelate
- La resistenza all'abrasione per prolungare la durata del manufatto e posticipare la sua sostituzione
- La sostituzione, almeno parziale, di additivi pericolosi per ambiente e saluti in fase di lavorazione e nel riciclo a fine vita (plastificanti aromatici, carbon black, ecc.)
- La riduzione della rumorosità dovuta sempre al rotolamento e attrito delle ruote sul manto stradale

Aspetti normativi

Alcune delle esigenze prima illustrate sono state recepite a livello comunitario con il Regolamento 1222-2009 che prevede l'etichettatura degli pneumatici con la classificazione delle prestazioni in termini di consumo carburante, aderenza su superfici bagnate e rumorosità durante la marcia. L'etichettatura (vedi figura 3) consente all'utilizzatore finale una visualizzazione diretta dei livelli prestazionali dello pneumatico per i tre parametri in oggetto.

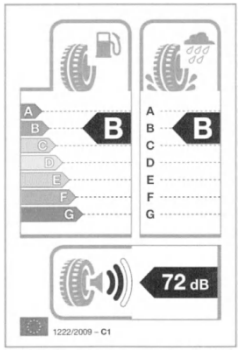


FIGURA 3: LABELLING DEGLI PNEUMATICI PREVISTO DAL REGOLAMENTO UE 1222-2009

39 https://epure.org/media/1350/briefing-on-the-road-to-2030-decarbonising-europes-road-transport-sector.pdf
40 Regolamento UE 1222-2009

Per quanto riguarda in particolare la classificazione dei consumi si può dire che uno pneumatico in classe A consente un risparmio di carburante di circa il 10% rispetto ad uno in classe G (a parità ovviamente di tutte le altre condizioni)

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E IN EUROPA

Come descritto nei paragrafi precedenti l'industria delle gomme sintetiche è un settore molto importante perché rappresenta grandi volumi produttivi e ricadute economiche. In ambito europeo la posizione dell'industria italiana si colloca nelle prime posizioni ed è pertanto evidente che il mantenimento di questa co-leadership richiede un adeguato sforzo in termini di Ricerca e Sviluppo.

Per pneumatici che contribuiscano alla riduzione del consumo di carburante occorre, come visto, che la mescola a base elastomerica abbia una Rolling Resistance più bassa possibile. La Ricerca in questo ambito ha conseguito nel corso degli anni risultati molto significativi che si ritiene abbiano ancora dei margini di miglioramento.

Le attività attuali hanno l'obiettivo di supportare i trend di rinnovamento che progressivamente sono richiesti al settore degli pneumatici, anche in considerazione dei cambiamenti profondi e globali che riguardano il sistema mobilità.

Per il prossimo futuro si prefigurano pneumatici sempre più sofisticati, dotati di molti sensori connessi a sistemi informatizzati per interagire con il veicolo in modo da garantire, oltre il risparmio energetico, la lunga durata, l'affidabilità in tutte le condizioni climatiche, la sicurezza nelle situazioni complesse come la foratura dello pneumatico oppure la guida autonoma via software.

Per quanto riguarda le linee di sviluppo per nuovi polimeri elastomerici (utilizzati come base per le mescole) e nuove tecnologie produttive, ci sono vari obiettivi in funzione delle caratteristiche desiderate per pneumatici di tipologie e applicazioni diverse. Si possono, in estrema sintesi, evidenziare le seguenti direttrici:

- Ottimizzazione della composizione isomerica del polimero: ad esempio nel caso del Poli-Butadiene variare le percentuali delle isomerie cis, trans.
- Ottimizzazione della architettura delle macromolecole per ottenere ad esempio diverse distribuzioni dei pesi molecolari oppure strutture ramificate anziché lineari.
- Sintesi di nuovi co-polimeri (ad esempio butadiene-isoprene) che consentano una migliore compatibilità nel caso delle mescole tra gomma naturale (Poli-Isoprene) e gomma sintetica (Poli-Butadiene).
- Funzionalizzazione delle macromolecole sintetiche con opportuni gruppi reattivi che consentano una miglior dispersione e adesione tra la matrice elastomerica e le cariche rinforzanti che vengono inserite nella mescola finale.
- Sviluppo esplorativo di tecnologie altamente innovative come quelle che permetterebbero di inserire cariche e-o additivi già durante la fase di sintesi del polimero.

L'industria italiana ha un suo patrimonio brevettuale (già concesso o in fase di richesta a seconda del livello di sviluppo raggiunto) che ne difende gli asset produttivi e che la rende competitiva rispetto alla concorrenza più qualificata.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

I costi economici, nell'arco dei prossimi 5 anni, sono stimati in 18 milioni di Euro costituito essenzialmente dal costo del personale di R&D che si prevede di impegnare su questi argomenti.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 15

ALGHE E UTILIZZO DI CO_2

Le emissioni di CO_2 sono un tema di rilevanza mondiale, in relazione all'incremento della temperatura media del pianeta e alle eventuali variazioni climatiche che sono oggetto di studi e valutazioni da parte dei più importanti enti ed istituti scientifici.

Il quantitativo di CO_2 annualmente immesso in atmosfera da attività antropiche e naturali è molto elevato e sono in corso numerose disamine scientifiche volte a stabilire per quanto possibile la natura delle emissioni e l'impatto da esse prodotto sull'equilibrio climatico.

La necessità di ridurre le emissioni di CO_2 è stata ribadita in varie sedi, in particolare dalla COP21, nell'ambito della quale è stato sancito un accordo con un obiettivo ambizioso: contenere l'aumento della temperatura globale del pianeta ben al di sotto dei 2°C, perseguendo idealmente il goal di 1,5°C.

In senso più generale, l'obiettivo macroscopico è quello di abbandonare gradualmente l'utilizzo di carburanti fossili, e mettere in pratica azioni coerenti con la scienza per raggiungere, entro il 2050, la completa "decarbonizzazione" ed uno sviluppo sostenibile.

Nonostante i recenti sviluppi geopolitici, l'attenzione alla minimizzazione delle emissioni rimane un argomento di primaria importanza per le regioni industrializzate europee e per il Regno Unito. Ne consegue la necessità di rivedere i paradigmi e le modalità con le quali produrre e utilizzare le risorse energetiche, da cui è scaturita la logica dell'economia circolare, i cui principali obiettivi sono l'estensione della vita dei prodotti, la produzione di beni di lunga durata, le attività di ricondizionamento e la riduzione della produzione dei rifiuti. Tale logica, inoltre, prevede il riciclo, nonché un migliore e più efficiente utilizzo delle risorse naturali.

Ciò che ad oggi ha però fortemente rallentato la crescita di investimenti e attività inerenti la CO_2 è stata la limitazione dettata dall'assenza di un mercato che favorisse o facilitasse investimenti indirizzati alla gestione delle emissioni e della CO_2. In altri termini l'economicità delle iniziative non ha mai raggiunto livelli minimi di interesse e dunque ha inibito lo sviluppo di un'area di business che potesse promuovere un nuovo settore industriale. La sola cattura delle emissioni di CO_2 non può essere un'azione sufficiente per poter meritare di essere promossa ad attività di valorizzazione; si tratta, dunque, di valutare ed individuare possibili soluzioni per valorizzare la CO_2, inserite in uno schema di economia circolare.

A causa delle quantità complessive su scala globale, della diversità e della distribuzione geografica delle fonti di CO_2 fossile, non si può pensare di individuare una singola tecnologia per l'abbattimento e la valorizzazione delle emissioni ma vanno considerate soluzioni diversificate da applicare singolarmente o in combinazione fra loro. Una delle tecnologie più promettenti per la cattura e l'utilizzo della CO_2 è la fotosintesi clorofilliana, ad opera di microalghe in grado di fissare la CO_2 nella biomassa vegetale, per sua successiva conversione ed utilizzo.

La biofissazione di CO_2 si basa sull'utilizzo dell'energia solare attraverso la reazione di fotosintesi per catturare ed utilizzare correnti di CO_2 purificata. Il principale vantaggio legato all'utilizzo delle microalghe, che sono microscopiche piante acquatiche, è relativo alla loro velocità di riproduzione, grazie alla quale - in opportune condizioni - riescono a raddoppiare la loro massa con una rapidità che può essere di interesse per applicazioni industriali. Tali organismi microscopici unicellulari vivono singolarmente o in colonie, in acqua dolci e salate, ed hanno la proprietà di assorbire la CO_2 insufflata nel mezzo di coltura e convertirla in materia organica.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

In generale, le grandi potenzialità di utilizzo della biomassa algale necessitano di sperimentazione e sviluppo affinché la biofissazione possa diventare una realtà commerciale diffusa, specialmente in campo energetico.
Gli aspetti meritevoli di investigazione sono:

Dewatering

La coltivazione di ceppi microalgali ad alta produttività, in vasche aperte (open ponds), fotobioreattori o altri sistemi, è solo il primo passo per la gestione della CO_2, la biomassa algale deve poi essere raccolta e convertita in prodotti che abbiano valore commerciale.
Separare la biomassa dalla fase acquosa in cui cresce è uno dei maggiori impedimenti all'ampia diffusione delle colture microalgali su scala commerciale.

Le criticità derivano dalla necessità di separare una piccola percentuale di biomassa da una grande quantità d'acqua bilanciando requisiti di efficienza, da un lato, con le esigenze di contenimento dei costi, dall'altro.
Per riuscire a raggiungere alte concentrazioni di biomassa, spesso si operano configurazioni che prevedono un trattamento a più passaggi e tecnologie diverse. Le concentrazioni di biomassa sono spesso espresse con il parametro TSS (Total Suspended Solid) che indica i solidi sospesi totali, un parametro molto usato soprattutto nella gestione della qualità dell'acqua e nella depurazione delle acque reflue.
Generalmente si esegue una prima fase di separazione, indicata con il termine harvesting, che porta la concentrazione della biomassa dal valore iniziale, che può essere 0.4% di TSS con produzione da fotobioreattori oppure 0.04% di TSS nel caso di produzione da open pond, a una concentrazione variabile dal 5 al 20% di TSS. Si fa quindi seguire una seconda fase di separazione, chiamata drying, dove si porta la concentrazione ai valori necessari all'estrazione delle alghe: dal 40% di TSS, nel caso di estrazione a umido, a valori superiori al 90% di TSS, nel caso di estrazione a secco

Estrazione

La biomassa algale raccolta, e poi essiccata, può essere utilizzata tal quale o può subire una estrazione delle sostanze di interesse commerciale.
Vi sono però difficoltà tecniche ed economiche anche relativamente allo step di essiccamento ed estrazione della biomassa umida, in funzione del contenuto residuo di acqua della biomassa rac-

colta nonché delle caratteristiche del prodotto finale desiderato. È molto importante, quindi, che i metodi di recupero della biomassa dal liquido colturale e di trattamento successivo devono, quindi, essere resi più efficienti e poco energivori, adattandoli agli specifici ceppi algali utilizzati.
I metodi usati per l'estrazione di lipidi da microalghe sono categorizzati come metodi meccanici e chimici. I metodi chimici di estrazione dei lipidi sono l'estrazione di Soxhlet, l'estrazione con fluidi supercritici e estrazione accelerata del solvente; i metodi meccanici sono la compressione, l'estrazione assistita da microonde e l'estrazione assistita da ultrasuoni. Il metodo chimico utilizza solventi organici come n-esano. La tecnologia di estrazione con fluido supercritico elimina l'uso di solventi tossici e usa gas CO_2 supercritica come solvente. L'efficienza dell'estrazione dell'olio può essere aumentata usando solventi come cloroformio, metanolo e n-esano. Per l'estrazione vengono utilizzati solventi sia polari che non polari e la loro scelta dipende dalla polarità del composto; i composti polari sono meglio estratti usando solventi polari e viceversa.

Bio-diesel da microalghe

Da alcuni anni è stata presa in considerazione la possibilità di usare le microalghe per generare combustibili di nuova generazione, in quanto esse sono in grado di produrre in modo sostenibile una quantità di energia per unità di superficie decisamente maggiore rispetto a quella ottenuta dal mais o dalla soia e anche dalla palma da olio tropicale. Si tratta di una coltura energetica che evita impatti dannosi sul mercato agroalimentare e sulla biodiversità terrestre.
In genere la produzione di biodiesel avviene mediante la reazione di transesterificazione. Tipicamente, i trigliceridi vengono fatti reagire con metanolo per produrre esteri metilici degli acidi grassi (che costituiscono il biodiesel) e glicerolo. La reazione si svolge in tre passaggi intermedi: dapprima i trigliceridi sono convertiti in digliceridi, poi in monogliceridi ed infine in glicerolo e esteri metilici degli acidi grassi. Si tratta di una reazione d'equilibrio che prevede l'utilizzo di un largo eccesso di metanolo (rapporto molare 6:1) per raggiungere rese del 98%. In genere si predilige una catalisi di tipo basico (NaOH, KOH) condotta a 60°C in condizioni di pressione atmosferica. In queste condizioni il tempo di permanenza richiesto in reattori discontinui è di circa 90 minuti.
Poiché i reagenti iniziali sono immiscibili tra loro, coesistono nel reattore due fasi liquide distinte.
Sfruttando lo stesso principio, la separazione finale dei prodotti, può essere compiuta mediante ripetuti lavaggi con acqua per asportare il metanolo ed il glicerolo residui. Studi molto recenti si propongono di migliorare le prestazioni di questa fase operando in continuo mediante particolari tipologie di reattori.
La produzione di olio algale non interferisce con la catena del cibo e quindi si pone come valida alternativa per la produzione di biodiesel advanced. Inoltre, l'olio algale stesso dopo opportuna purificazione può essere anche utilizzato per la produzione di biofuels advanced (green diesel) presso le bio raffinerie Eni.

Analisi di mercato

È strettamente necessaria una approfondita analisi di mercato, da utilizzare come strumento rapido ed affidabile per comprendere la segmentazione del mercato, le sue dimensioni, la richiesta. Tale analisi va corredata da una sistematica raccolta ed analisi di dati relativi ai problemi connessi

al marketing dei beni prodotti, così da fornire elementi per poter prendere di conseguenza le decisioni corrette per orientare l'ottimizzazione del processo al/i prodotto/i maggiormente richiesto/i.

Life Cycle Assessment (LCA)

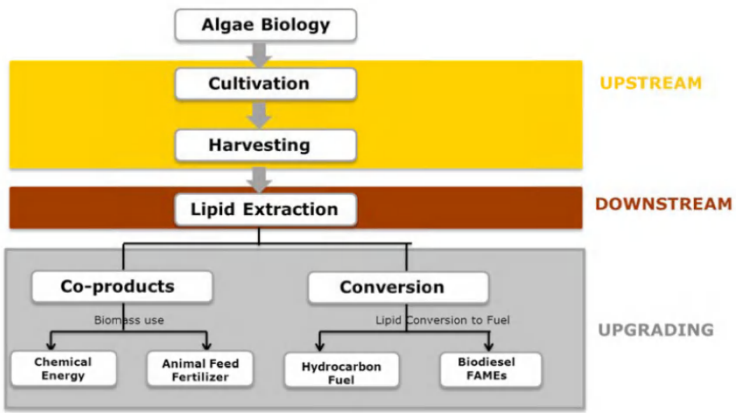
L'obiettivo finale di tale analisi è quello di definire un quadro completo delle conseguenze ambientali dirette o indirette causate dalle attività inerenti la biofissazione. È fondamentale individuare prodotti energetici con bilanci favorevoli e valutare le interazioni con l'ambiente, considerando il ciclo di vita intero, gli impatti sulle persone, sull'ecosistema, sull'eventuale impoverimento delle risorse, esaminando anche gli impatti di carattere economico e sociale.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Negli ultimi 50 anni si è assistito ad una evoluzione della produzione di microalghe su piccole e larga scala. Le specie di interesse sono:

- Chlorella:
- 1960, Giappone, primo produzione su scala industriale di microalghe per il consumo umano
- Spirulina:
- 1970, Mexico City, primo impianto commerciale per la produzione di Spirulina
- 1980, Salton Sea, California: impianto per la produzione di Spirulina (Earthrise Nutritionals, LLC)
- 1980, Kona, Hawauu, impianto di produzione di Spirulina (Cyanotech Corp)
- Dunaliella
- 1980, Australia, USA, Isreal, leader per la produzione di betacarotene
- Haematococcus
- 1990, USA, Israel, per la produzione di astaxantina

La produzione di microalghe viene orientata a differenti scopi, prevedendo alcuni steps che sono schematizzati nella figura sottostante



I players maggiormente attivi nel settore sono i seguenti:

SOLAZYME	**FERMENTATION/CHEAP PLANT BASED SUGARS (BIOMASS)**	**100K MT GROUND BREAKING (FUELS AND CHEMICALS)**	**2012**
SAPPHIRE ENERGY	**OPEN POND OR PLASTIC BAGS/ POWER PLANT CO_2+SUNLIGHT**	**PILOT FACILITY (COLUMBUS, OH)**	**2011**
SOLIX BIOFUELS	**CLOSED PBRS/POWER PLANT CO_2+SUNLIGHT**	**DEMO PLANT (COLORADO)**	**2009**
AURORA ALGAE	**OPEN POND/CO_2 + SUNLIGHT**	**DEMO PLANT (WESTERN AUSTRATIA)**	**2009**
ORIGIN OIL	**EXTRACTION TECHNOLOGY PROVIDER**	**DEMO PLANT (AUSTRALIA)**	**2011**
ALGENOL	**DIRECT TO ETOH PBR/CO_2 +SUNLIGHT**	**FLORIDA SITE ANNOUNCED (36 ACRES)**	**2010**
BODEGA ALGAE	**PBR/CO_2 +SUNLIGHT**	**PBR MANUFACTURE**	**2009**
SEAMBIOTIC	**OPEN POND/FLUE GAS CO_2 +SUNLIGHT**	**10 HA PLANT**	**2012**

In particolare, la coltivazione di alghe in open ponds ha raggiunto la massima produttività di 15-20 g/m^2/giorno e la massima estensione di 100-150 ha, e i principali players sono:

FOOD AND FEED	**BIOFUELS, FOOD AND FEED**	**BIOFUELS**
• **QUALITAS HEALTH – ISRAEL**	• **AURORA – USA E AUSTRALIA**	• **SAPPHIRE ENERGY – USA**
• **NECTON – PORTUGAL**	• **CELLANA – USA**	• **NESTE OIL – FINLAND**
• **REED MARICULTURE – USA**	• **CLEAN ALGAE - SPAIN**	• **ALGENOL BIOFUELS - USA**
• **FITOPLANCTON MARINO – SPAIN**	• **ORIGINOIL - USA**	
• **YANTAI – CHINA**	• **AQUAVIRIDIS – MEXICO**	
• **ASTAXA – GERMANY**	• **SEAMBIOTIC – ISRAEL**	
• **PROVIRON – BELGIUM**		
• **ARCHIMEDE – ITALY**		
• **ALGAE BIOTECH - NETHERLANDS**		
• **KIBBUTZ MAAGAN MICHAEL – ISRAEL**		
• **MONZON BIOTECH – SPAIN**		
• **CYANOTECH – HAWAII (USA)**		
• **EARTHRISE – USA**		

La coltivazione di alghe in fotobioreattori ha raggiunto la massima produttività di 25-27 g/m^2/giorno e la massima estensione di 1-4 ha, e i principali players sono:

FOOD AND FEED	**BIOFUELS, FOOD AND FEED**	**BIOFUELS**
• **NECTON, S.A. – PORTUGAL**	• **ALGAETECH INTERNATIONAL**	• **ENN – CHINA**
• **ASTAXA – GERMANY**	• **BFS BIOPETROLEO - PORTUGAL**	• **CLEANENERGY – CHILE**
• **FITOPLANCTON MARINO – SPAIN**	• **SEE ALGAE TECHNOLOGY –AUSTRIA**	• **ENN – CHINA**
• **MICROPHYT – FRANCE**	• **ALGAENERGY - SPAIN**	• **CLEANENERGY – CHILE**
• **LGEM - THE NETHERLANDS**	• **ALGAETECH – MALASYA**	
• **SOLIX BIOSYSTEM– USA**	• **BTME AND EXELERIA – SPAIN**	
• **EXENIA GROUP – ITALY**	• **QIBEBT – CHINA**	
• **SALATA GMBH – GERMANY**		
• **ALGATECHNOLOGIES – ISRAEL**		

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

Le risorse necessarie sono di circa 30 milioni di euro per i prossimi quattro anni, che prevedono il completamento e l'investigazione degli aspetti sopramenzionati oltre alla realizzazione e conduzioni di impianti pre-industriali.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 16

VALORIZZAZIONE CO_2 PER MATERIALI AVANZATI

Il primo problema da considerare se si vuole inserire l'anidride carbonica come reagente in un generico processo chimico è rappresentato dalla sua elevata stabilità termodinamica (ΔHf = -393 kJ/mole). L'anidride carbonica, assieme all'acqua rappresenta il prodotto finale di tutti i processi di combustione sia a livello biologico che chimico. Per questa ragione possiamo definire la CO_2 come una forma "spenta" di carbonio, nonostante ciò una innumerevole quantità di organismi vegetali impiega CO_2 per produrre migliaia e migliaia di composti.

Da un punto di vista energetico la conversione di CO_2 in altri prodotti richiederà una quantità di energia che dipende dal tipo di prodotti che si intende produrre. In termini generali se la CO_2 è incorporata come unità intera all'interno di un nuovo composto (come ad esempio nelle reazioni di carbossilazione) l'energetica del processo è abbastanza favorevole, mentre nelle reazioni in cui è necessario trasformare in maniera rilevante la struttura molecolare della CO_2, l'energia da fornire al sistema sarà necessariamente elevata. Pertanto considerando l'aspetto energetico delle reazioni che coinvolgono la CO_2 è possibile catalogarle e suddividerle in due principali categorie:

(1) Processi ad alta energia. Sono reazioni in cui la struttura molecolare della CO_2 viene modificata pesantemente portando ad esempio alla formazione di formaldeide (H_2CO), metanolo (CH_3OH), metano (CH_4) o idrocarburi pesanti. In questi casi i ΔH di reazione sono generalmente molto elevati ed è necessario fornire energia al sistema di reazione in vari modi: elettroni (in processi di riduzione elettrochimica), idrogeno (in processi di idrogenazione catalitica, generalmente condotti ad elevate temperature) metalli (reazioni con metalli o complessi in basso stato di ossidazione o elementi del Gruppo 1), radiazioni (splitting della CO_2 a CO e ossigeno in presenza di radiazioni ad alta energia).

(2) Processi a bassa energia. Sono quelle reazioni in cui la molecola di CO_2 viene incorporata nel prodotto di reazione senza o con poche modifiche strutturali. Tali processi portano alla formazione di carbossilati (RCOOH(R')), lattoni, esteri, carbammati (RR'NCOOR"), carbonati organici ($(RO)_2CO$), urea e derivati ($(RNH)_2CO$), materiali polimerici come policarbonati e poliuretani, carbonati e bicarbonati inorganici. Generalmente in questi casi i ΔH di reazione sono molto vicino a zero oppure sensibilmente negativi. In queste reazioni la CO_2 reagisce con sistemi elettron ricchi quali ad esempio acqua basica (H_2O/OH^-), ammine (RR'NH), carboanioni (RR'R"C-), olefine, alchini, dieni, epossidi, etc, in processi che spesso sono condotti in condizioni blande, talvolta perfino a temperatura ambiente o inferiore.

In termini generali possiamo riassumere i concetti sopra esposti dicendo che i prodotti ottenuti da CO_2 facendo riferimento al punto (1) possono essere principalmente utilizzati come fuels, mentre quelli ottenibili secondo il punto (2) sono utilizzabili industrialmente come chemicals e/o polimeri, ne consegue che la produzione di chemicals o polimeri da CO_2 richiede generalmente una bassa somministrazione di energia al sistema, mentre la produzione di fuels da CO_2 può avvenire esclusivamente attraverso processi che richiedono un elevato consumo di energia.
Bisogna puntualizzare però che a livello mondiale il mercato dei fuels è 10-15 volte più grande di quello dei chemicals e che in genere in questi processi è richiesta una minore selettività rispetto a quella necessaria per produrre chemicals.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Da quanto finora esposto risulta evidente che la trasformazione della CO_2 in prodotti può risultare economicamente favorevole se l'energia necessaria viene da fonti energetiche a basso prezzo. A livello mondiale il volume di CO_2 impiegato per la produzione di prodotti chimici, composti organici, polimeri e carbonati inorganici nel 2011 ammontava, al lordo degli impieghi captivi, a circa 200x106 ton/a ed è previsto che possa crescere nei prossimi anni fino ad arrivare a circa 350x106 ton/a nel 2025. Questi volumi comunque sono ben lontani dalle emissioni di CO_2 in atmosfera, derivanti principalmente dall'utilizzo di combustibili fossili (che sono ad oggi superiori di due ordini di grandezza: nel 2018 sono state emesse in atmosfera ~ 40x109 ton/a), ma fanno comunque parte del portfolio di tecnologie che possono contribuire a rendere attrattiva la cattura della CO_2.

Perché si abbia un aumento considerevole nell'utilizzo della CO_2 nei processi chimici è necessario trovare vie di trasformazione economicamente sostenibili che portino alla produzione di materiali che siano di ampia diffusione, che inglobino in modo permanente quantità ponderali elevate di composto.
Tra le varie possibilità risulta particolarmente interessante la produzione di policarbonati alifatici da epossidi e CO_2. Inoltre, l'inglobamento di CO_2 all'interno di un materiale polimerico, consente uno stoccaggio temporaneo che è tanto più interessante quanto più è lungo il tempo di vita degli oggetti fabbricati con il polimero prescelto.
Per queste ragioni lo sforzo maggiore e l'obiettivo principale della ricerca consiste nella preparazione di nuovi sistemi catalitici e nel mettere a punto nuovi processi per la produzione di polimeri che abbiano al tempo stesso un elevato contenuto di CO_2 inglobata, proprietà meccaniche tali da consentire l'impiego in settori ad alto consumo e con una elevata durata nel tempo degli articoli prodotti. Per quanto riguarda l'innovazione di processo tanto dipenderà dalle caratteristiche del materiale che si intenderà portare in produzione: polimero amorfo o cristallino, valore della temperatura di transizione vetrosa, viscosità del mezzo di reazione, che dipendente fortemente dal peso molecolare. Ad ogni modo l'ottimizzazione dei parametri di processo, l'eventuale utilizzo di solventi di reazione, così come il recupero del polimero e la sua trasformazione in pellets o in un formato utile per i trasformatori, potrebbero contribuire significativamente a contenere il consumo energetico e aumentare i margini sulla produzione. Ma la chiave per ottenere policarbonati con proprietà chimico fisiche e meccaniche migliorate,

tali da poter invadere nuovi settori di mercato, sta nella realizzazione di nuovi sistemi catalitici che riescano in qualche modo a controllare i parametri della reazione quali la regio- e la stereoselettività. Inoltre sempre con l'utilizzo di catalizzatori "ad hoc" si può pensare di ottenere dei policarbonati da usare come precursori insieme ad altri monomeri polimerizzabili.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Esistono già produzioni a livello industriale di policarbonati alifatici e alla fine del 2015 risultavano attivi due produttori negli Stati Uniti (Novomer Inc. e Empower Materials Inc.) e cinque produttori in Cina (Taizhou Bangfeng Plastic Co., Ltd., Nanyang Zhongju Tianguan Low Carbon Sci. and Tech. Co., Ltd., Jiangsu Zhongke Jinlong Chemical Co., Ltd., Inner Mongolia Mengxi High-Tech Group Co., Ltd., China BlueChemical Ltd.). Attualmente la produzione complessiva di questi materiali polimerici si aggira intorno a 100x103 ton/a, ma è prevedibile un trend in crescita nei prossimi anni.
Riguardo ai produttori americani si sa che Empower Materials Inc. produce, attraverso un sistema catalitico proprietario a base di zinco ed ha in listino fondamentalmente quattro materiali polimerici che sono principalmente impiegati in film barriera in composizioni multi-strato, come addensante nella formulazione di inchiostri e in oggettistica biodegradabile.
Per quanto riguarda invece i produttori cinesi si sa che sono attivi nella produzione di poli(propilen carbonato) degradabile. Inoltre, poiché questi materiali hanno peggiori lavorabilità e minori performance meccaniche rispetto alle comuni plastiche biodegradabili, quali acido poli lattico (PLA) e polibutilen succinato (PBS), trovano campi di applicazione più limitati e per queste ragioni il governo cinese ha avviato politiche di supporto alla produzioni di materiali plastici degradabili basati su poli(propilen carbonato).
Infine, in questo settore va segnalato il lavoro di Bayer che ha sviluppato, attraverso un programma di ricerca perseguito per molti anni, materiali poliuretanici basati sull'incorporazione di oligocarbonati dioli ottenuti per polimerizzazione, in condizioni controllate, di epossidi e CO_2. Questa produzione, realizzata congiuntamente a Covestro, viene impiegata nella fabbricazione di materassi a memoria di forma.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

Considerando l'obiettivo di produrre materiali avanzati innovativi a base di policarbonati alifatici, lo sforzo iniziale che si dovrà sostenere riguarda principalmente l'attività di ricerca su nuovi sistemi catalitici e nuovi processi di produzione. Per queste attività si stima che siano necessari 20-30 milioni di euro per i prossimi tre anni.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 17

CEMENTI CELLULARI INNOVATIVI A BASSA IMPRONTA ENERGETICA

Più del 50% del patrimonio edilizio italiano è stato realizzato nel quarantennio compreso tra gli anni '50 e gli anni '90 con criteri di efficienza che, pur evoluti nel tempo, spesso non sono compatibili con gli standard attuali. Dove non è necessario procedere alla sostituzione diretta dell'esistente è possibile pensare ad interventi di rigenerazione edilizia, utilizzando prodotti sostenibili in cui le risorse locali e i rifiuti industriali possono essere utilizzati per la produzione di materiali ad alte prestazioni, in una prospettiva di economia circolare. In questo contesto si pone il calcestruzzo cellulare, un calcestruzzo aerato caratterizzato da una bassa densità ed eccellenti proprietà di isolamento termico.
Attualmente è possibile distinguere tra due tipi di calcestruzzo cellulare, differenti tra loro in base al metodo di produzione:

a) calcestruzzo aerato non autoclavato (NAAC), espanso mediante iniezione di una schiuma stabile o un agente schiumogeno all'interno di un mix di base di pasta di cemento (cemento + acqua) o malta (cemento + sabbia + acqua);
b) calcestruzzo aerato autoclavato (AAC), aerato aggiungendo una quantità predeterminata di polvere di alluminio e altri additivi ad un fango costituito da sabbia silicea, cemento, calce e acqua.

Caratteristica fisica comune ad entrambe le tipologie è la presenza al loro interno di vuoti d'aria, direttamente responsabili di una bassa conduttività termica e di un elevato isolamento acustico, nonché del buon rapporto resistenza/peso. In definitiva, il calcestruzzo cellulare è un prodotto con un buon equilibrio tra le proprietà meccaniche e quelle termiche.
Qui ci si soffermerà principalmente sul calcestruzzo aerato autoclavato, particolarmente utilizzato nella bioedilizia grazie alle buone caratteristiche tecniche (densità, isolamento termico ed acustico, resistenza meccanica, resistenza al fuoco, ecc.) ed all'estrema facilità di posa in opera (è direttamente prodotto in blocchi di dimensioni standard che agevolano la messa in opera).
La storia del cemento aerato autoclavato iniziò approssimativamente un secolo fa, quando Aylsworth & Dyer, negli U.S.A., usarono alluminio in polvere e idrossido di calcio come agenti aeranti per la formazione di idrogeno, pratica ulteriormente sviluppata da Grosahe a Berlino nel 1919. Da allora la polvere di alluminio si è affermata come strumento in grado di determinare l'aereazione del "fango cementizio" con il conseguente rilascio di bolle di idrogeno di differenti dimensioni. Il salto di qualità che consentì ai calcestruzzi aerati di raggiungere anche una buona resistenza meccanica lo fece l'architetto svedese Johan Axel Eriksson che, al fine di accelerare la stagionatura di ventotto giorni dei campioni di calcestruzzo aerato, utilizzò un'autoclave ottenendo un prodotto finale con maggiore resistenza a compressione in tempi fortemente contenuti

(circa 12 ore). Da allora la "ricetta" del calcestruzzo aerato autoclavato di fatto non è più cambiata e le innovazioni di prodotto sono state fortemente contenute, limitandosi al normale progresso tecnologico del processo produttivo industriale.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Il numero ridotto di componenti base del "mix design" ed il metodo realizzativo relativamente semplice e fortemente consolidato potrebbero suggerire una scarsa attitudine del prodotto allo sviluppo.

Tuttavia è possibile individuare alcuni campi in cui lo sviluppo di nuovi approcci potrebbe migliorare il prodotto sia da un punto di vista prestazionale che energetico ed ambientale. In particolare, uno dei principali settori di potenziale sviluppo è quello che da sempre è rimasto immutato, ovvero il processo di aereazione. L'individuazione di un agente aerante diverso dalla polvere/pasta di alluminio comporterebbe una serie di vantaggi di seguito riassunti.

Miglioramento della sicurezza: un aspetto critico nella fase di produzione rispetto all'utilizzo della polvere di alluminio come agente aerante è da ricercare nel fatto che lo stoccaggio e le modalità di utilizzo di questo componente necessitano di prescrizioni per la sicurezza negli ambienti di lavoro in merito all'infiammabilità a contatto con l'aria e alla liberazione di gas infiammabili a contatto con acqua. Tutte le operazioni riguardanti lo stoccaggio, la movimentazione e la manipolazione del materiale devono avvenire rispettando condizioni di sicurezza stringenti; in particolare è necessario fare riferimento alle linee guida ATEX (ATmospheres EXplosibles). Lo sviluppo di un agente aerante innovativo comporterebbe quindi un vantaggio in termini di sicurezza sul lavoro ed un vantaggio economico per ciò che riguarda l'eliminazione dei siti di stoccaggio.

Maggiore sostenibilità ambientale: la presenza della polvere di alluminio tra le materie prime utilizzate nella produzione dell'AAC ne condiziona la valutazione finale in termini di impatto ambientale. Infatti, la produzione dell'alluminio metallico avviene partendo dalla roccia di bauxite (per ogni kg di alluminio ottenuto sono necessari 4 kg di bauxite), per cui l'estrazione in miniera e la successiva purificazione comportano un dispendio energetico e un costo ambientale in termini di CO_2 rilasciata in atmosfera. Sulla base di queste considerazioni, l'eliminazione della polvere di alluminio dal processo di produzione dell'AAC può risultare quindi vantaggiosa in termini di impatto ambientale finale.

Ulteriori ambiti di indagine sono:

- Individuazione di diverse tipologie di legante: la sostituzione del cemento Portland, utilizzato nella miscela di base dell'AAC, con leganti caratterizzati da un minore impatto energetico ed ambientale può rendere il processo produttivo più sostenibile. In tal senso possono essere indagate le possibilità di utilizzo di leganti a base di solfoalluminato di calcio il cui ciclo produttivo è caratterizzato da ridotte emissioni di CO_2 nell'ambiente, a causa di una minore presenza di carbonato di calcio tra le materie prime e di un più limitato consumo di combustibile durante la fase di cottura. Inoltre, il fabbisogno energetico necessario per la produzione di questa tipologia di legante è di gran lunga inferiore a quello del Portland. Una delle questioni da indagare in questo caso sarebbe la relazione tra la quantità di ettringite formata e la fase di indurimento in autoclave dell'AAC. Un aumento di volume legato ad una

presenza elevata di ettringite potrebbe provocare pericolose tensioni con conseguenti fessurazioni dei manufatti cementizi.

- Utilizzo di scarti di lavorazione industriali ed agricoli: la possibilità di utilizzare nel mix design dell'AAC residui di processi industriali e/o agricoli risponde all'esigenza di rendere il prodotto finale sempre più sostenibile. Ad esempio l'utilizzo di fumo di silice in sostituzione (parziale o totale) della sabbia di silice o l'impiego della lignina come fluidificante sono dei campi di sperimentazione che, se accompagnati dal successo, aprono nuovi scenari di utilizzo del calcestruzzo cellulare nell'ottica di un riutilizzo di materiali in successivi cicli produttivi, riducendo al massimo gli sprechi.
- Miglioramento delle prestazioni meccaniche: un campo di indagine interessante è la possibilità di incrementare le capacità di resistenza alle sollecitazioni meccaniche del calcestruzzo aerato autoclavato, impiegando sia fibre sciolte di origine naturale (organiche o inorganiche) sia armature inserite all'interno dei blocchi direttamente in fase realizzativa. Questa condizione, unita alla leggerezza intrinseca del materiale, renderebbe l'AAC ancor più utilizzabile in zone sismiche.

L'obiettivo finale è quindi quello di sviluppare un calcestruzzo cellulare sostenibile e durevole con un buon equilibrio tra le proprietà meccaniche e termiche, principalmente a base di cemento e scarti o sottoprodotti industriali.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Il calcestruzzo aerato autoclavato occupa attualmente il 4,5% del mercato italiano ed è detenuto da 4-5 produttori. È un mercato dalle dimensioni in volume e valore ancora contenute, suscettibile però di una notevole espansione nei prossimi anni. D'altra parte, nella maggior parte degli altri paesi membri dell'UE l'AAC costituisce da tempo una delle soluzioni costruttive di più largo impiego, tanto da avere una penetrazione nel settore edilizio superiore al 40%. Nel medio periodo si prevede quindi una crescita del 10% della quota di mercato dell'AAC rispetto al mercato totale degli elementi in muratura.

Queste ragioni spingono fortemente le attività di ricerca e sviluppo.

È stato recentemente brevettato da ENEA un cemento aerato autoclavato innovativo ed eco-sostenibile, denominato BAAC, acronimo di "bio aerated autoclavated concrete", in cui il processo di aerazione, principale oggetto di indagine e sperimentazione nella realizzazione di questi materiali leggeri, è ottenuto grazie ad una reazione di catalasi organica con il perossido di idrogeno (H_2O_2). La lievitazione del cemento, con la conseguente formazione di bolle al suo interno, è quindi ottenuta utilizzando un microrganismo (le cellule di lievito e in particolare Saccharomyces cerevisiae, il comune lievito di birra diffusamente utilizzato nella panificazione) e il perossido di idrogeno (acqua ossigenata). La reazione di dismutazione del perossido di idrogeno, a seguito della quale si ottengono come prodotti di reazione ossigeno molecolare e acqua, è un processo esoergonico che avviene a temperatura ambiente, quindi non necessita di alcuna somministrazione di calore aggiuntivo, a differenza dal processo industriale di produzione dell'AAC che necessita di un apporto di energia termica per favorire la reazione tra alluminio e idrossido di calcio, come indicato

dalle principali case produttrici. I risultati delle analisi comparative tra il prodotto innovativo BAAC e quello commerciale AAC, riferiti ai valori di resistenza meccanica e densità del prodotto finale, hanno evidenziato la validità del processo ottenuto tramite il mezzo di aerazione organica. Altro aspetto a favore della sostenibilità del BAAC è l'ulteriore, estrema semplificazione della ricetta che, nella sua forma base, comprende cemento, sabbia silicea, acqua ed i due agenti aeranti, acqua ossigenata e lievito di birra.

Rispetto a quest'ultimo è bene evidenziare come non sia necessario utilizzare un prodotto alimentare, ma possono essere potenzialmente impiegati anche gli scarti del ciclo di lavorazione della birra.

Il miglioramento può e deve avvenire cercando di impiegare nel processo realizzativo sempre più materiali "naturali" o di scarto anche da biomassa che aumentino l'impronta di sostenibilità del prodotto finale. Si pensi all'impiego di lignina che, agendo da fluidificante, potrebbe diminuire l'impiego di acqua e quindi contenere il rapporto A/C.

Altro aspetto di ricerca degno di nota è l'utilizzo all'interno del cemento cellulare di fibre sciolte il cui effetto cucente è capace di arrestare o rallentare l'avanzamento del processo fessurativo dovuto al ritiro igrometrico e ai carichi esterni, limitando l'allargamento delle aperture, garantendo così al prodotto finale un miglioramento della resistenza a trazione, anche dopo la formazione delle fessure. La presenza di fibre nell'impasto potrebbe facilitare la produzione industriale in cui la movimentazione dei grossi blocchi nell'impianto durante le varie fasi realizzative può facilmente comportare nella pasta cementizia fessurazioni che, se profonde, possono determinare lo scarto del prodotto finale autoclavato.

Un altro aspetto da segnalare è il processo produttivo, rimasto immutato da tempo nei suoi principi generali ma fortemente migliorato da un punto di vista industriale. Basti pensare all'importanza dell'automazione e del controllo dei processi, ovvero all'utilizzo di autoclavi tecnologicamente avanzate.

La fase di industrializzazione delle sperimentazioni sin qui svolte, sia sull'utilizzo di agenti aeranti innovativi che di additivi e fibre alla miscela tradizionale, comporta il cambiamento e, per certi aspetti, la semplificazione del processo produttivo. Nel caso del cemento aerato autoclavato, semplificazione può significare anche il radicale cambiamento della filosofia dell'impianto produttivo: basti pensare che l'utilizzo come agente aerante del lievito di birra e dell'acqua ossigenata potrebbe comportare:

a) la non necessità di riscaldare la boiacca cementizia durante la fase di lievitazione come nel caso di utilizzo della pasta di allumino. La maggiore temperatura facilita la reazione che porta poi alla formazione di bolle di idrogeno. La lievitazione nel caso dell'agente aerante innovativo può anche avvenire a temperatura ambiente;
b) la progettazione di un nuovo impianto di miscelazione dei componenti che deve tenere conto della relazione tra l'avvio della reazione tra lievito di birra ed acqua ossigenata e il passaggio della boiacca nei cassoni entro cui avviene la lievitazione dell'impasto.

Anche l'utilizzo delle fibre comporta un'attenta riprogettazione del ciclo produttivo, in particolare nella parte in cui i grandi blocchi di cemento lievitato, prima di essere avviati all'autoclave per la

maturazione, sono sagomati e tagliati mediante fili metallici che attraversano l'intera massa cementizia. La presenza di fibre potrebbe comportare un'estrema difficoltà nel taglio dell'impasto e l'eventuale trascinamento al suo interno delle fibre stesse.
In questo quadro complessivo l'Italia non vanta una tradizione nello sviluppo di impianti industriali per la produzione di calcestruzzi aerati autoclavati, progettati e realizzati principalmente in Germania. Esiste invece una storica tradizione di ricerca e sviluppo nel campo dei cementi e dei manufatti cementizi per ottimizzare i processi produttivi e sviluppare prodotti sostenibili e durevoli.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

Le risorse necessarie sono di circa 5 milioni di euro per i prossimi tre anni.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 18

MATERIALI E TECNOLOGIE DI PROCESSO AVANZATE PER TURBINE A GAS PER LA GENERAZIONE ELETTRICA

Il settore della generazione di energia è in continua evoluzione, spinto dalla domanda di una maggiore efficienza, sia energetica che ambientale. Diventa pertanto preminente l'impiego di materiali e tecnologie di processo avanzate, di crescente efficienza, in grado di traguardare un utilizzo più razionale delle fonti fossili impiegate per la trasformazione in energia elettrica mediante l'impiego delle turbine a gas.
Efficienza e rispetto dell'ambiente spingono la ricerca in tre direzioni:

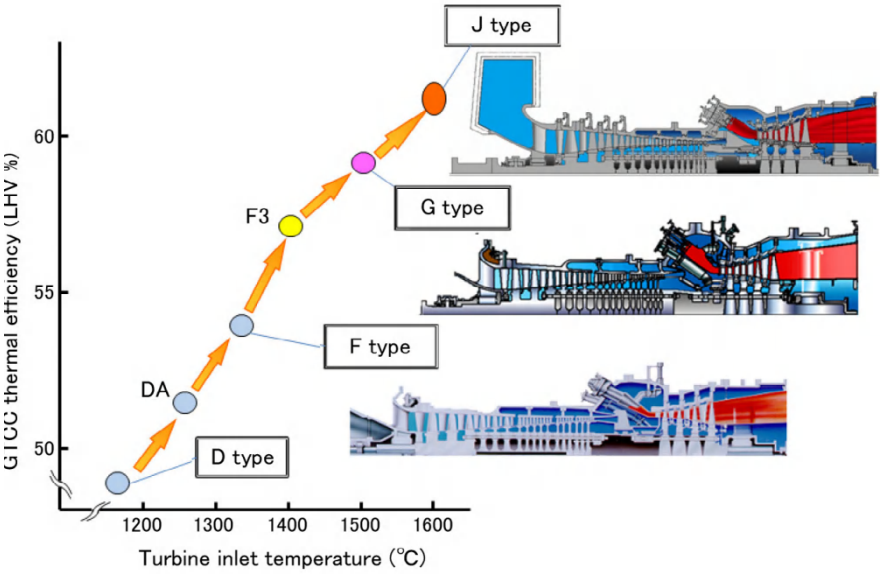
- sviluppo e utilizzo crescente delle fonti rinnovabili per ridurre l'utilizzo dei combustibili fossili;
- efficientamento energetico, tanto per il settore industriale, quanto per quello domestico e per il settore dei trasporti;
- investimenti nelle tecnologie di produzione di energia elettrica da fonti fossili con materiali e processi in grado di limitare le emissioni in atmosfera.

Tra gli interventi per incrementare l'efficienza, la strada più immediata verso la produzione di energia riducendo le emissioni nocive consiste nel migliorare gli impianti termoelettrici, diminuendo la quantità di combustibile utilizzato (a parità di energia elettrica sviluppata) e quindi le emissioni specifiche dei gas serra.
Le tecnologie impiantistiche attuali, che hanno diversi gradi di maturità, hanno avuto nel recente passato una continua evoluzione verso prestazioni energetiche via via migliorate. Tale tendenza, nella direzione di una lenta ma continua evoluzione verso efficienze più elevate, continuerà anche nel prossimo futuro, spinta dalla ricerca tecnologica su materiali avanzati e criteri di progettazione sempre più spinti.
L'aumento del rendimento dei cicli combinati a gas naturale è dovuto prevalentemente alle migliori prestazioni delle turbine a gas. In particolare, gli studi vertono su di una serie di tecnologie chiave che riguardano principalmente:

- materiali ad alta resistenza termomeccanica;
- tecnologie per compressori, combustori e turbine ad elevate performance;
- sistemi di raffreddamento e di protezione con barriera termica delle palette di turbina;
- sviluppo di sistemi e processi di manifattura e tecnologie di ispezione avanzati.

Grazie a tali studi vi è un costante incremento della temperatura di ingresso dei gas in turbina (TIT - Turbine Inlet Temperature), che ha condotto allo sviluppo di turbine a gas a ciclo combinato

(GTCC) di classe J, con TIT~1600°C, con un efficienza superiore al 60%[41], e con l'obiettivo di traguardare nei prossimi anni TIT di 1700°C[42]. Dall'aumento della TIT, dipende infatti l'aumento di efficienza conseguibile per le grandi turbogas industriali.



Un'ultima importante considerazione va fatta in merito alle nuove condizioni di esercizio nate dalla forte diminuzione della richiesta di energia emersa a seguito della crisi economica degli ultimi anni: si è reso infatti necessario un funzionamento discontinuo degli impianti per evitare un surplus di produzione, con conseguente spegnimento frequente degli stessi. Ciò determina uno scenario differente nell'utilizzo degli impianti, cui si richiede una maggiore flessibilità e dunque criteri di progettazione differenti. Circostanza che, a sua volta, incide sulle proprietà dei materiali (ad esempio le superleghe), che sono utilizzati con cicli di accensione-spegnimento più simili al funzionamento di motori aeronautici, cosa di cui bisogna tenere conto in ultima istanza.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Da molti anni ormai le tematiche di riduzione dell'impatto ambientale sono un incentivo formidabile per il miglioramento dei processi nel settore della generazione elettrica, e costituiscono la leva per lo sviluppo di nuovi impianti a ciclo combinato e processi per la produzione di componenti aventi più elevata efficienza, caratterizzati da un minore impatto ambientale e che soddisfino al contempo criteri di elevata sostenibilità.

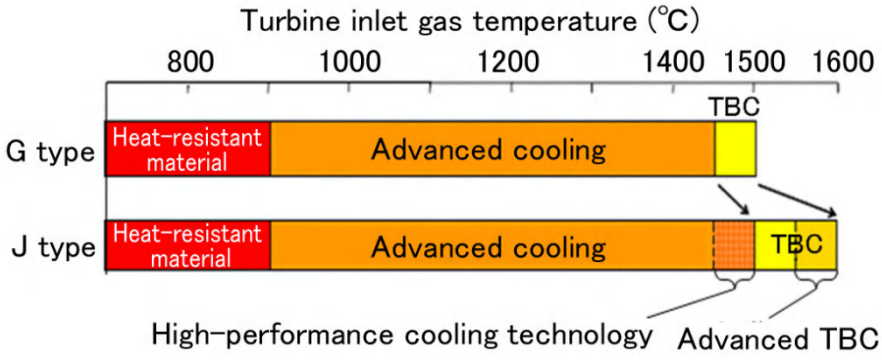
41 Development of 1600°C-Class High-efficiency Gas Turbine for Power Generation Applying J-Type Technology, Mitsubishi Heavy Industries Technical Review Vol. 50 No. 3 (September 2013)

42 Key Technologies for 1700 Class Ultra High Temperature Gas Turbine, Mitsubishi Heavy Industries Technical Review Vol. 54 No. 3 (September 2017)

In tale ambito, la capacità di sviluppare attività di sviluppo industriale, unitamente ad attività di R&S nel settore della generazione elettrica resta di primaria importanza per l'economia del Paese.
Infatti, le tecnologie di sviluppo sono fondamentali per incrementare la competitività di aziende operanti in Italia in tale settore, dove gran parte del fatturato viene generato proprio dalla vendita di prodotti ad alta tecnologia (le turbogas industriali e relativi componenti come le pale di turbina in superlega) presso mercati esteri.
Queste aziende sono la sede di un patrimonio industriale e di un know-how di altissimo livello, in grado di generare sviluppo duraturo e occupazione qualificata, in un settore ad elevata intensità tecnologica.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Gli aspetti meritevoli di investigazione nei prossimi anni sono:
Efficienza del motore: è necessario investigare gli aspetti critici dell'efficienza del motore. In particolare, per questo aspetto è legato principalmente ai sistemi di raffreddamento e di protezione con barriera termica delle palette di turbina, come si evince dalla figura seguente (rif. Nota 16 - Development of 1600°C-Class High-efficiency Gas Turbine for Power Generation Applying J-Type Technology, Mitsubishi Heavy Industries Technical Review Vol. 50 No. 3 (September 2013)).



Dal buon raffreddamento delle palette di turbina (realizzato mediante l'utilizzo di anime ceramiche nel processo di microfusione a cera persa) dipende parte della capacità di una paletta nel motore di dissipare la propria energia termica, a vantaggio delle prestazioni finali del motore.
L'obiettivo da raggiungere è lo sviluppo di anime ceramiche più capaci, nel processo di fonderia, di resistere senza eccessive distorsioni e/o rotture alle sollecitazioni termiche e meccaniche del processo di colaggio, in modo da garantire i ristretti requisiti di progetto e alte rese di processo.
Negli ultimi anni sono emersi nuovi criteri progettuali (anime a doppia parete) e nuove tecnologie di manifattura (additiva, per accelerare i tempi di sviluppo e/o realizzare geometrie troppo complesse per le tecniche di manifattura tradizionale).
Per quanto riguarda la barriera termica (TBC Thermal Barrier Coating), i principali sforzi sono orientati verso lo studio dei materiali a più bassa conducibilità termica, che si leghino bene con i

materiali sottostanti per evitare mismatch reticolari e/o tali da ben tollerare espansioni e contrazioni (ed evitare così distacchi in esercizio), riducano i fenomeni di erosione e ossidazione indesiderati. Oltre ai materiali, sono importanti la modellazione del comportamento termico e meccanico, la sensoristica in-line (es. IR, luminescenza vs riflettività, che varia con le difettosità presenti), l'ottimizzazione tecnica e la competitività economica dei processi di manifattura.

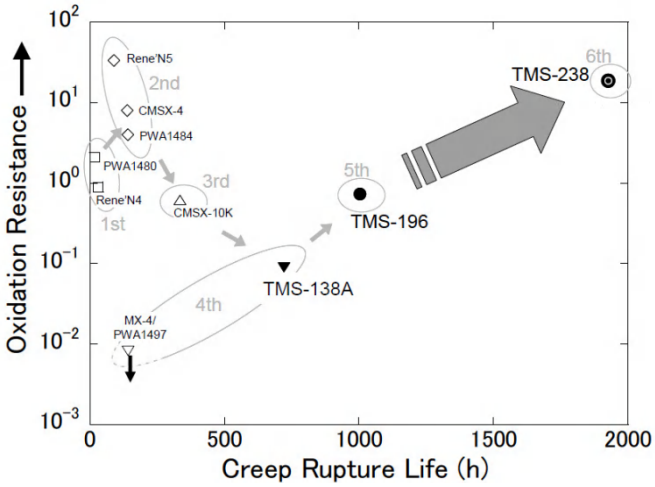
Altre componenti del motore su cui lavorare sono il compressore e il combustore.

Per migliorare l'efficienza del motore, accanto all'aumento della TIT, è necessario aumentare il rapporto di compressione, per cui diventano importanti i criteri progettuali da adottare (così come l'utilizzo di metodi avanzati di simulazione numerica del flusso d'aria), mentre per il combustore, i criteri di progettazione mirano a ridurre per quanto possibile l'emissione di NOx.

Nell'ambito dell'efficienza del motore, la resistenza meccanica, alla fatica, all'ossidazione e alla corrosione dei materiali utilizzati hanno un ruolo centrale.

Con la tecnologia della microfusione a cera persa si fabbricano attualmente i componenti in superlega per le parti più calde delle turbine dei grandi motori per la generazione elettrica. L'avvento delle superleghe monocristalline ha aumentato la resistenza alla fatica termomeccanica e al creep durante le fasi di esercizio, grazie all'assenza di punti deboli, identificabili nei bordi di grano delle superleghe convenzionali (equiassiche) o direzionali (a grani colonnari).

L'utilizzo di composizioni elementali sempre più raffinate e dei metalli refrattari (RM) nelle superleghe di 3° e 4° generazione (prima del Re, poi del Ru) ha migliorato la stabilità microstrutturale e il comportamento a creep ad alte temperature, ma con costi certamente più elevati rispetto alle leghe più commerciali, ed una resistenza all'ossidazione peggiorata, come si evince nel grafico sottostante[43].



43 Development of an oxidation-resistant high-strength sixthgeneration single-crystal superalloy TMS-238, Superalloys 2012: 12th International Symposium on Superalloys:Single Crystal Alloys & Behavior

Ulteriori sviluppi verso leghe di quinta e sesta generazione hanno privilegiato e incrementato la presenza del rutenio (fino a oltre il 6%), migliorando la resistenza all'ossidazione mediante un migliore bilanciamento tra i metalli refrattari. Il problema di queste leghe è però duplice: il costo elevato (a causa dei costosi metalli refrattari introdotti) e la castability, cioè la capacità di adoperare queste leghe nelle fonderie in modo efficace e profittevole.
In sintesi, lo sviluppo di pale rotoriche e statoriche per le turbine dei motori più efficienti per il settore della power generation deve tenere conto di un efficace bilanciamento tra resistenza meccanica, stabilità di fase e utilizzo efficace dei materiali adottati; ciò implica l'adozione di appositi programmi di progettazione di nuove leghe (alloy design) e ricerche molto complesse su nuovi o più performanti materiali.
Per quest'ultimo aspetto, i metalli refrattari (RM) sono attualmente utilizzati come componenti per applicazioni ad altissima temperatura in atmosfera inerte, sfruttando le loro eccezionali proprietà intrinseche (alto punto di fusione, ottima resistenza meccanica e a scorrimento), rendendoli i candidati ideali per sostituire le superleghe a base di Ni nelle turbine a gas. Tuttavia, essi soffrono di gravi problemi di ossidazione, anche a temperature relativamente basse. Al contrario, i siliciuri (di Mo o Nb, ad esempio) possono essere utilizzati nell'aria a temperature più elevate ed hanno un grande potenziale per le applicazioni ad alta temperatura, anche se la loro lavorabilità risulta piuttosto difficile.
Sviluppo delle tecnologie di produzione e di modellazione: per arrivare a rendere il processo di produzione delle palette di turbina più competitivo bisogna sviluppare una metodologia operativa che miri sempre più ad un approccio di "zero defect manufacturing", anche in un'ottica di Industry 4.0.
Ciò presuppone di investigare sui seguenti aspetti:

- numero e tipologia delle variabili da controllare, controllo di processo più rigoroso per ridurre al minimo la difettosità intrinseche dei processi, mediante l'utilizzo di Cloud e Big Data per la gestione e l'analisi di un'ampia base di dati, in grado di ottimizzare prodotti e processi produttivi;
- maggior ricorso all'automazione, anche con l'utilizzo di robot collaborativi, per ridurre l'incidenza di difettosità in alcuni processi, legata alla forte manualità ancora esistente nel processo di fabbricazione delle palette della fonderia;
- tecnologie di Additive Manufacturing per lo sviluppo e la realizzazione di componenti ancillari in modo rapido ed efficiente;
- sviluppo di tecnologie fusorie in grado di garantire una maggiore efficienza metallurgica;
- sviluppo di tecnologie di monitoraggio e controllo di processo avanzati, in grado di garantire una maggiore efficienza del processo di manifattura;
- efficienza delle tecnologie di fabbricazione, nell'ottica di un ridotto impatto ambientale (minore consumo di materia prima e/o energia) e di un continuo miglioramento delle condizioni di lavoro delle maestranze;
- potenziamento dell'utilizzo di SW di modellazione numerica, in primis per il processo di colaggio e successiva solidificazione dei getti poiché consente vantaggi enormi grazie alla riduzione dei costi operativi e dei tempi di sviluppo dei nuovi prodotti.

L'obiettivo è l'ottenimento di una tecnologia di processo di microfusione che ridefinisca l'utilizzo di ormai consolidate best practice alla luce degli standard tecnologici più moderni, dove l'informatizzazione, l'automazione e una più solida conoscenza teorica portino ad un livello di manifattura "zero defect like".

Per quanto detto, molteplici sono gli ambiti di studio aperti, legati ad esempio una conoscenza più strutturata dei materiali adoperati, specie per ciò che concerne le loro proprietà chimico-fisiche ad elevate temperature e le evoluzioni di tali proprietà durante i cicli termici, sia durante le fasi di fabbricazione e sia durante il loro utilizzo in esercizio.

Un secondo ambito di studio è costituito dalle tecnologie di processo adoperate per la fabbricazione delle palette di turbina, specie per quanto riguarda i processi critici del colaggio e ancor più della solidificazione.

Un terzo ambito è quello dei controlli di processo e di prodotto. Strumentazioni più efficaci, anche in linea, sarebbero auspicabili qualora fossero di facile applicabilità, poiché renderebbero il processo più efficiente, con un'assoluta certezza interpretativa sul processo e sul prodotto.

Nel quadro complessivo descritto, in Italia ci sono competenze nello sviluppo di superleghe, maturate all'interno di progetti di R&S, ma più in generale non ci sono aziende di produzione: queste di fatto vengono sviluppate e prodotte in pochi paesi (USA, Russia, Inghilterra, Francia, Germania, Giappone), dove si studiano e realizzano nuove superleghe per le turbogas.

Per contro, negli ultimi anni si è lavorato molto sui materiali ceramici costituenti le anime ceramiche introdotte nei manufatti per realizzare i canali interni di raffreddamento (o alleggerimento) ed ora si dispone di competenze scientifiche e industriali per la manifattura di tali semiprodotti.

Pertanto, seppur restano per ragioni storiche e industriali, dei ritardi nello studio e sviluppo delle superleghe, in Italia notevoli passi avanti sono stati fatti nello sviluppo delle tecnologie manifatturiere e nelle linee di ricerca riguardanti la microfusione a cera persa per la produzione di pale di turbina in superlega, grazie agli investimenti fatti negli ultimi anni, in particolare in Campania.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

Le risorse necessarie per le attività di R&S sono di circa 15 milioni di euro per i prossimi cinque anni.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 19

LUBRIFICANTI INNOVATIVI PER IL SETTORE INDUSTRIA

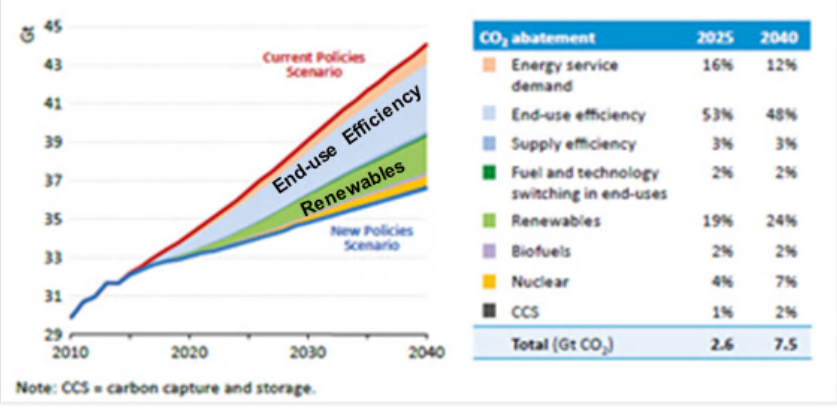
Il riscaldamento globale è un fenomeno influenzato notevolmente e negativamente dall'azione dell'uomo. La CO_2 prodotta con la combustione, i gas ad effetto serra, le attività agricole intensive e non sostenibili, la riduzione delle aree forestali dovuta all'urbanizzazione e alla costruzione di infrastrutture, sono tutti elementi che contribuiscono ad innalzare la temperatura del pianeta. La sola CO_2 è responsabile del 64% del riscaldamento globale causato dall'uomo.

Nel 2015, con l'accordo di Parigi sul clima, le principali major energetiche si sono date l'obiettivo della riduzione di CO_2 e di conseguenza di un minor consumo di combustibili di origine fossile a favore dello sviluppo delle energie rinnovabili, questo per contenere l'innalzamento della temperatura del pianeta al di sotto dei 2°C rispetto ai livelli pre-industriali.

In questo nuovo scenario, si prevede per il 2040 un aumento delle emissioni globali di CO_2 di origine fossile da 31.6 Gt a 36.7 Gt, corrispondente a una crescita annua dello 0.5%, valore inferiore sia alla crescita attuale dell'1.2% che all'1.9% degli ultimi 25 anni (ved. Fig. 1)

Un fattore chiave per rallentare la crescita delle emissioni è l'aumento dell'efficienza energetica attraverso la quale si stima di ottenere circa il 50% dei risparmi previsti.

Il maggior contributo alla riduzione delle emissioni sarà da imputare al miglioramento dell'efficienza energetica legata agli edifici (45%), risultato di una regolamentazione edilizia più restrittiva e di un inseverimento degli standard relativi alla prestazione energetica di elettrodomestici e impianti di riscaldamento. A seguire, il settore dei trasporti (34%) e il settore industriale (21%).



CO_2 abatement	2025	2040
Energy service demand	16%	12%
End-use efficiency	53%	48%
Supply efficiency	3%	3%
Fuel and technology switching in end-uses	2%	2%
Renewables	19%	24%
Biofuels	2%	2%
Nuclear	4%	7%
CCS	1%	2%
Total (Gt CO_2)	**2.6**	**7.5**

FIG. 1 ABBATTIMENTO DELLE EMISSIONI DI CO_2 AL MONDO: SCENARIO ATTUALE VS SCENARIO FUTURO
(Fonte: IEA World Energy Outlook 2015)

Cosa si può fare per raggiungere l'obiettivo?
Innanzitutto progettando macchine a più elevata efficienza ma anche proponendo lubrificanti innovativi che contribuiscano ad aumentare il rendimento delle macchine stesse. In questa ottica l'olio non è più visto come un elemento "accessorio" ma di progettazione. I lubrificanti, se derivanti da materie prime da fonti rinnovabili, possono inoltre fornire un contributo aggiuntivo alla riduzione della "carbon footprint" del settore industriale e dei trasporti.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

La ricerca è da tempo impegnata nell'individuare soluzioni tecnologiche finalizzate all'incremento dell'efficienza energetica nei diversi settori di applicazione dei prodotti per la lubrificazione.
Nel settore dei lubrificanti industria si possono individuare differenti campi applicativi in cui l'olio può concorrere attivamente all'incremento dell'efficienza energetica.
La crescente domanda del mercato di macchine ad alta efficienza per l'industria Oil&Gas ha portato allo sviluppo di tecnologie meccaniche con prestazioni sempre più elevate.
In tale prospettiva la riduzione delle perdite di potenza rappresenta uno dei fattori determinanti per incrementare l'efficienza di turbine e compressori.
A supporto di tale evoluzione l'individuazione e l'utilizzo di lubrificanti con caratteristiche reologiche e chimico-fisiche ottimizzate può contribuire in maniera significativa al conseguimento di questo obiettivo.

Per flessibilità e modularità, le turbine a gas costituiscono attualmente una valida soluzione per la produzione di energia elettrica.
Lo scenario evidenzia un settore in rapida evoluzione, guidato da una forte competizione e dalla necessità di innovazione tecnologica.
In particolare alle nuove turbomacchine vengono richieste sempre maggiori potenze specifiche ed elevate caratteristiche energy saving, riduzione del consumo del gas di alimentazione e conseguente riduzione delle emissioni.
Da un punto di vista formulativo il lubrificante deve possedere caratteristiche reologiche studiate "ad hoc" per l'applicazione e deve garantire un eccellente livello di performance in termini di protezione dalla degradazione termoossidativa, protezione dei metalli, proprietà antiruggine e tribologiche allo scopo di allungare gli intervalli di cambio e contribuire anche attraverso la sua maggior durata alla salvaguardia dell'ambiente.
Eni, grazie alla sua Ricerca, dispone di una linea di eccellenti prodotti tradizionali ed è leader del mercato italiano e ha da poco sviluppato e messo sul mercato la prima linea al mondo di prodotti con caratteristiche energy saving con la quale intende rafforzare ulteriormente la sua presenza nel settore delle turbomacchine.
Questo settore rappresenta solo una delle applicazioni industriali su cui si può agire per migliorare l'efficienza energetica.
I processi di laminazione a vergella (semilavorato in acciaio per il settore industria e l'edilizia) rappresentano un'altra interessante applicazione dove le perdite per attrito viscoso nei cuscinetti sono decisamente elevate e prodotti con caratteristiche energy saving potrebbero contribuire a ridurle in maniera sostanziale.

I sistemi idraulici rappresentano un ulteriore ambito in cui lo sviluppo di lubrificanti con caratteristiche energy saving può dare un valido contributo in termini di efficienza energetica. Infatti, l'impiego di basi sintetiche pregiate impartisce all'olio ottimali caratteristiche reologiche e contribuisce ad allungare la vita utile della carica.
Anche nel campo degli oli per ingranaggi si possono formulare prodotti a base sintetica che grazie ad additivi antiusura e per estreme pressioni sono in grado di contribuire ad una minor dissipazione di energia negli ingranaggi.
Il continuo sviluppo tecnologico dei moderni macchinari sta portando all'utilizzo di grassi di alta qualità, con un allungamento della vita in esercizio ed un aumento dell'efficienza energetica. Come per gli altri prodotti industria anche per i grassi la scelta dell'additivazione resta un punto chiave nell'ottica del miglioramento dell'energy saving.
Il target di una maggiore sostenibilità ambientale puo' essere raggiunto sia attraverso prodotti finalizzati ad incrementare l'efficienza energetica, come visto negli esempi citati, ma anche mediante l'impiego di prodotti biodegradabili e/o da fonti rinnovabili.
Un valido contributo alla formulazione di lubrificanti in linea con le nuove istanze ambientali è dato per esempio dalle basi lubrificanti di tipo estereo derivanti dalla lavorazione di prodotti agricoli, coltivati preferibilmente in terreni marginali.
Queste basi infatti derivano da fonti rinnovabili, sono vantaggiose in termini di bilancio della CO_2, hanno in genere elevata biodegradabilità, bassa tossicità e, se opportunamente selezionate in funzione dell'applicazione, risultano superiori in termini di prestazioni "classiche" anche alle basi sintetiche.
La biodegradabilità e la bassa tossicità rendono inoltre gli esteri vantaggiosi nel formulare lubrificanti per ambienti particolarmente critici come quello marino (olio per astucci portaelica), quello agricolo e comunque in tutte le applicazioni in cui può verificarsi uno sversamento nell'ambiente (oli idraulici per mezzi agricoli e per mezzi urbani, ecc.).
In aggiunta alle basi esteree sono allo studio ulteriori basi lubrificanti innovative da fonti rinnovabili, che per le loro caratteristiche sono indicate per lo sviluppo di oli ingranaggi per le pale eoliche. Queste basi opportunamente additivate potranno dare origine a prodotti molto performanti con un allungamento sensibile della vita utile dell'olio e pertanto molto interessanti per l'impiego in aree geografiche non facilmente accessibili (ad es. campi eolici offshore).

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Nel 2017 la richiesta mondiale di lubrificanti è stata di 40,000 ktons. Di questi, il 16%, pari a 6,400 ktons, è costituito dagli oli industria.
I fluidi idraulici con oltre il 50% del volume guidano il mercato, seguiti dagli oli per turbine, ingranaggi, oli da circolazione e grassi, con quote comprese tra 10-15% e infine oli per compressori.
Con oltre il 40% dei volumi l'Asia rappresenta il principale mercato dove gli oli industria sono impiegati nell'estrazione, nella generazione di potenza, nella produzione di mezzi di trasporto e nell'industria manifatturiera.
L'Asia è seguita dal Nord America e dall'Europa con oltre il 20% di volumi. La parte rimanente è distribuita tra Asia-Pacifico, Sud America, Africa e Medio Oriente.

Nei mercati regionali si possono distinguere 2 tipi di categorie: mercati maturi e mercati in via di sviluppo. I mercati maturi, tra cui Nord America ed Europa, generalmente utilizzano prodotti di qualità superiore (lubrificanti sintetici) coprendo con questi il 15% dei volumi contro il 10% max nei mercati in via di sviluppo.
Un'altra differenza sostanziale è rappresentata dall'approccio degli utilizzatori finali che evidenzia una differente sensibilità culturale nei confronti dell'ottimizzazione dei processi. Nei mercati emergenti l'attenzione alla gestione delle cariche d'olio in esercizio è quasi inesistente mentre nei mercati consolidati rappresenta un valore aggiunto irrinunciabile, che consente, attraverso il monitoraggio dei parametri critici dell'olio di allungarne la vita utile con impatto positivo sull'efficienza energetica.
In termini di forniture il mercato è molto frammentato, con solo 2 produttori (Shell e ExxonMobil) che possiedono ciascuno oltre il 10% della quota del mercato globale e i cosiddetti "top 10 suppliers", che detengono in totale circa il 50% di quota nel mercato globale.
Generalmente i mercati in via di sviluppo, per la presenza di compagnie petrolifere nazionali, sono meno frammentati ed i 10 produttori più importanti possiedono oltre i due terzi del mercato.
Il trend del mercato per il prossimo futuro sarà dettato da:

- incremento nell'utilizzo di prodotti ad elevate performance;
- sviluppo di macchine ad alta efficienza che richiede l'impiego di lubrificanti di alta qualità;
- aumento di sistemi di gestione delle cariche allo scopo di allungare la vita utile dell'olio.

L'aumento di lubrificanti sintetici rimane il punto chiave per il mercato del futuro in quanto solo prodotti con eccellenti caratteristiche saranno in grado di lavorare in condizioni operative estremamente severe, in macchinari sempre più evoluti, di soddisfare le raccomandazioni degli OEM e di raccogliere l'apprezzamento da parte degli utilizzatori finali sui vantaggi derivanti dall'uso di questa tipologia di lubrificanti.
Nel settore eolico specialmente per l'offshore dove i campi eolici sono spesso in zone remote soggette a condizioni climatiche estreme, c'è la necessità di aumentare l'affidabilità delle scatole ingranaggi ma anche di allungare la vita utile della carica per limitare il più possibile i cambi olio.
L'evoluzione delle macchine è un altro fattore che spinge verso l'utilizzo di prodotti sintetici. Ad esempio, i nuovi sistemi idraulici sono dotati di serbatoi dalle dimensioni contenute rispetto al passato. A causa della riduzione del volume del fluido rispetto alla portata della pompa, il tempo disponibile per il suo raffreddamento ed il rilascio dell'aria intrappolata è notevolmente ridotto e le condizioni di temperatura e pressione elevate. In queste condizioni così severe i prodotti formulati con basi minerali non sono adeguati ed è necessario ricorrere a prodotti sintetici.
Sostanzialmente il mercato dei lubrificanti industria è un mercato stabile tanto che per il 2021 è previsto solo un leggero incremento della domanda intorno allo 0,2%. In questo contesto i prodotti in crescita sono gli oli per turbine e oli da circolazione a causa di un aumento nella richiesta di elettricità a livello mondiale, per tutte le altre tipologie di prodotti ci si aspetta un aumento più contenuto.
I biolubrificanti, con un mercato compreso tra 250-300 Ktons nel 2016, hanno a lungo sofferto a causa delle scarse performance, del costo elevato e l'uso destinato solo ad applicazioni di nicchia.

Tuttavia la situazione attuale sta cambiando grazie alla definizione di biobasi di nuova generazione, più performanti e con un costo più contenuto. Pertanto il settore dei biolubrificanti rappresenta uno dei settori con il più elevato potenziale di crescita. Le ragioni sono molteplici: una nuova spinta nei confronti dei biolubrificanti si sta verificando soprattutto negli Sati Uniti ed in Europa dove le industrie subiscono sempre di più il fascino di questi prodotti, in parte in risposta ai requisiti normativi ma anche perché sono attratti dalla loro alta qualità e dalle loro caratteristiche energy saving.
Per concludere, i fornitori che disporranno di un portafoglio prodotti di gamma elevata e ben consolidato, che instaureranno stretti rapporti di collaborazione con i costruttori e saranno in grado di fornire un adeguato sistema di monitoraggio e gestione delle cariche si troveranno in una posizione di vantaggio.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

Le risorse necessarie per lo sviluppo di un prodotto sono comprese tra 600 k€ e 3 M€ euro nell'arco di tre anni.

5. VALORIZZAZIONE ENERGIE RINNOVABILI

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 20
CELLE FOTOVOLTAICHE AVANZATE E INNOVATIVE

Le celle fotovoltaiche sono dispositivi in grado di trasformare l'energia solare in energia elettrica mediante un unico passaggio termodinamico, ovvero una conversone diretta. Attualmente le celle fotovoltaiche sono realizzate mediante tecnologie consolidate basate su silicio mono- o policristallino. Nonostante queste coprano il 95% del mercato mondiale, si trovano in commercio anche pannelli basati su altre teconologie a "film sottile" (tellururo di cadmio (CdTe), seleniuro di rame, indio e gallio (CIGS), seleniuro di rame e indio (CIS). In tempi più recenti sono state esplorate altre tecnologie, attualmente ancora non diffuse sul mercato in quanto ancora lontane dalla dimostrazione di una sufficiente stabilità tale da garantire una vita accettabile per l'utente finale. Tra queste, due in particolare hanno suscitato un vivo interesse nel campo della ricerca di base e applicata: le celle fotovoltaiche polimeriche, di tipo organico, e le celle fotovoltaiche a base di perovskiti, di tipo sostanzialmente inorganico o ibrido. Su queste due tecnologie si focalizzerà la discussione seguente.

Il fotovoltaico organico (OPV) utilizza polimeri e altre molecole organiche come materiale assorbente. Si caratterizza per il limitato utilizzo di materiale, essendo una tecnologia a film sottile, e per la possibilità di ottenere dispositivi su substrati flessibili. Nella sua versione più semplice, una cella solare organica è costituita da uno strato fotoattivo frapposto tra due elettrodi, di cui almeno uno semitrasparente, per permettere il passaggio della luce. Lo strato fotoattivo è in generale composto da un materiale organico donatore di elettroni e di un materiale accettore di elettroni. Il primo ha la funzione di assorbire la luce promuovendo un elettrone nello stato eccitato; l'accettore ha la funzione di estrarre l'elettrone dal materiale donatore, rendendolo disponibile per essere raccolto agli elettrodi e generare così corrente elettrica. Donatore e accettore sono solitamente miscelati tra di loro su una scala nanometrica, formando una struttura parzialmente ordinata nota come eterogiunzione diffusa. Per migliorare le prestazioni dei dispositivi, inoltre, sono in genere presenti degli strati intermedi in grado di favorire il trasporto delle cariche dallo strato attivo agli elettrodi. La letteratura riporta inoltre configurazioni più sofisticate, quali celle a multigiunzione.

In letteratura il termine perovskite compare alla fine dell'ottocento per indicare una struttura cristallina formata da ossido di calcio e titanio ($CaTiO_3$). Più in generale col termine perovskite si individua una struttura ABX_3 con A e B aventi funzione di cationi ed X anione (ossigeno, alogeno o metallo), nell'ipotesi di fondo che le dimensioni di A siano maggiori di quelle di B. Se A è un metallo, si parlerà di perovskiti inorganiche, se A è una molecola organica, si parlerà di perovskiti ibride. I materiali che si ottengono possono avere pronunciate proprietà ferroelettriche, magnetiche, piezoelettriche, superconduttive ed anche fotovoltaiche. Per queste ultime applicazioni presentano maggiori interessi le perovskiti metallo-organiche in cui il suddetto catione è il meti-

lammonio ($CH_3NH_3^+$ - MA^+) o il formamidinio ($CH(NH_2)_2^+$ - FA^+), mentre il catione metallico B solitamente impiegato è il piombo (Pb^{2+}) sotto forma di ioduro o bromuro. È stato considerato anche lo stagno (Sn^{2+}) come catione metallico, ma le prestazioni ottenute con questo metallo sono state decisamente inferiori a quelle col piombo. In questi materiali è stato possibile individuare un forte assorbimento ottico nella regione spettrale del visibile ed un valore affinità elettronica intorno a 3,9eV ed un valore di band gap confrontabile con quelle dei semiconduttori comunemente utilizzati in ambito fotovoltaico. Ad esempio la perovskite comunemente utilizzata in questo ambito: il Piombo-ioduro di metil-ammonio $CH_3NH_3PbI_3$, assume un valore di band gap diretta di 1,57eV. Un grande vantaggio di questo materiale consiste nella possibilità di modificare il valore di bandgap della perovskite e quindi il taglio del suo assorbimento sullo spettro di radiazione solare, combinando due alogeni, ovvero sostituendo parzialmente lo iodio con un altro elemento del gruppo VII (ad esempio il bromo Br) per ottenere una perovskite mista $CH_3NH_3PbI_3$-xBrx la cui bandgap potrà assumere un valore compreso fra 1,57eV e 2,3eV rispettivamente per frazione x = 0 e X = 1. In base agli studi più recenti sembra che la fase mista comporti una maggiore stabilità della perovskite nel tempo. La bandgap diretta del materiale consente di utilizzare spessori di circa 500n per assicurare un completo assorbimento della radiazione solare fino al taglio; tuttavia la lunghezza di diffusione dei potatori fotogenerati inferiore a 100nm finora misurata, richiede una struttura di tipo P-I-N per garantire una raccolta efficace, tramite meccanismo di drift, dei portatori di carica. Ovvero la perovskite si comporta da materiale intrinseco (I) ed è circondata da due strati per l'estrazione selettiva di elettroni (N) o di lacune (P).

Il meccanismo di fotogenerazione nella perovskite ha un comportamento simile a quello che avviene materiali presenti nelle celle solari DSSC (Dye Sensitized Solar Cell), ovvero di tipo eccitonico, in cui l'eccitone (stato eccitato del singolo elemento di materiale a seguito dell'interazione con un fotone) ha un tempo di vita sufficiente a rilassare solo quando incontra un materiale cui cedere il suo stato eccitato. Questo corrisponde alla cessione di un elettrone all'elettrodo tipicamente N che nelle celle DSSC è realizzato prevalentemente mediante TiO_2. Sempre nelle DSSC dall'alltro elettrodo (controelettrodo) un elettrone viene ceduto all'elettrolita (solvente organico) ioduro/tri-ioduro e converte un tri-ioduro in ioduro (ossido-riduzione) che a sua volta cede un elettrone al colorante ("Dye") che potrà essere nuovamente eccitato. In relazione a questo meccanismo, le celle a base di Perovskite hanno ricevuto un iniziale rapido sviluppo beneficiando delle grandi esperienze sviluppate proprio con le celle DSSC nelle quali è stato semplicemente rimpiazzato il colorante (elemento attivo) con la perovskite mantenendo la struttura porosa dell'elettrodo di TiO_2 al fine di garantire, come per il colorante, un più facile scambio di elettroni con la Perovskite. Purtroppo i limiti legati alla stabilità nel tempo del materiale colorante, accentuati durante la prolungata esposizione al sole, affliggono anche la perovskite, tuttavia oggi sono state dimostrate stabilità di efficienza per circa 1000 ore di irraggiamento.

Vista la comune struttura delle celle sia a base di perovskite che Organiche lo studio e lo sviluppo dei materiali estrattori selettivi di carica (N e P) rappresenta un elemento di grande interesse, in quanto essi devono contribuire sia al raggiungimento di elevate efficienze di cella solare, sia alla stabilità delle celle stesse senza imporre limiti alle tecnologie di realizzazione e costi non accettabili.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

A fronte di efficienze relativamente basse che saranno discusse nel paragrafo seguente, specie su dispositivi di larga area, la tecnologia OPV presenta alcune interessanti caratteristiche:

- basso consumo di materiale: i materiali organici e polimerici presentano coefficienti di estinzione molto elevati, il che permette di assorbire una buona quantità della radiazione solare già in strati dell'ordine delle decine di nanometri. Con un chilogrammo di polimero è possibile realizzare una superficie di celle fotovoltaiche organiche della grandezza di un campo da calcio;
- leggerezza: l'uso di film sottili e di supporti plastici permette di rendere i pannelli estremamente leggeri. È è possibile ottenere in prospettiva dispositivi con rapporti potenza/peso dell'ordine di 100 W/kg, ossia dieci volte più alti del silicio. Questo fa sì che si possano realizzare più facilmente, ad esempio sistemi di generazione di energia da trasportare in zone remote o disastrate;
- processabilità: i polimeri utilizzati nello strato attivo possono essere disciolti in solventi per dare inchiostri stampabili su substrati flessibili con tecniche analoghe a quelle utilizzate nell'industria tipografica. I processi di produzione su scala industriale risultano dunque piuttosto semplici, a elevato rendimento e a basso consumo energetico;
- buone performance in luce diffusa: l'OPV è meno sensibile all'inclinazione dei raggi del sole. Risulta dunque piuttosto efficiente in condizioni di luce diffusa e indiretta (ad esempio nelle ore mattutine e serali on in condizioni di cielo coperto). Ne deriva che per quanto l'OPV sia ancora meno efficiente del fotovoltaico convenzionale, l'energia prodotta da celle OPV nell'arco dell'intera giornata possa essere superiore a quella prodotta da celle di silicio Inoltre, l'OPV sembra essere particolarmente indicato per applicazioni indoor in cui la fonte di luce da catturare è data da sorgenti artificiali;
- sostenibilità ambientale: grazie a quanto detto sopra, è stato stimato che è possibile raggiungere valori di energy payback time per la tecnologia OPV dell'ordine di un paio di mesi, contro i circa due anni del silicio. Il fattore di emissione della CO_2 associato al ciclo produttivo è stato stimato in 4-18, contro 28-36 del silicio multicristallino.

Stime economiche suggeriscono nel lungo termine costi inferiori a 0,1 €/Wp. Tuttavia, se non si considera il costo solo in termini di €/Wp, ma si include nel conto anche il costo complessivo del sistema fotovoltaico, il gap con altre tecnologie si riduce già allo stato attuale, grazie alla riduzione dei costi di installazione e delle infrastrutture attesi dall'impiego di una tecnologia leggera e facilmente installabile.

Il grande interesse per la perovskite è nato dalla familiarità con le strutture DSSC in cui essa ha preso il posto del colorante. Le celle così ottenute hanno rapidamente raggiunto valori di efficienza anche superiori al 20% a livello di laboratorio, su aree di poco inferiori al cm^2 e per tempi brevi. Per la realizzazione di celle a film sottile valgono tutti i principi sottolineati per le celle OPV in quanto alcuni dei processi realizzativi ed alcuni materiali sono del tutto analoghi nelle due tipologie di celle solari.

Sebbene a livello di laboratorio si utilizzi molto la tecnica spin coating per la realizzazione del

materiale Perovskite, a livello industriale sono invece allo studio metodi di screen printing e blade coating o slot dye coating. Di recente è comunque stato dimostrato che è possibile ottenere film di Perovskite anche per evaporazione termica. Questo metodo consentirebbe uno sviluppo più rapido a livello industriale, in quanto più facilmente controllabile in termini di spessore e di omogeneità del materiale, nonché garantirebbe grande compatibilità con le tecniche convenzionali di realizzazione di celle solari con conseguenti vantaggi nella riduzione degli investimenti. Rimangono però ancora aperti i problemi relativi ai materiali P e N che completano il dispositivo e soprattutto la realizzazione di questi su larga area a basso costo come anche i problemi legati alla realizzazione di strati di TCO di conducibilità e trasparenza adeguati se depositati su substrati plastici flessibili.
La possibilità di modificare la bandgap della perovskite ha aperto un enorme interesse per la realizzazione di celle tandem a struttura sovrapposta in cui la cella a base di perovskite realizzasse un assorbimento dello spettro di radiazione solare compreso fra i 350nm (taglio del vetro) e i 750nm e fosse trasparente per la radiazione solare di lunghezza d'onda superiore ai 750nm (top cell) in modo da essere raccolta da una cella solare a base di silicio (bottom cell). Il connubio fra le due celle garantirebbe, se ottimizzato, una fotocorrente pari a circa la metà di quella prodotta da una cella solare in silicio, ma una tensione maggiore del doppio di una cella solare in silicio. Quindi una efficienza di cella che potenzialmente potrebbe arrivare al 42%.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

La tecnologia OPV ha ricevuto negli ultimi anni un forte interesse dalla comunità scientifica internazionale. Nonostante l'avvento delle celle a base di perovskiti che hanno focalizzato l'interesse, i gruppi di ricerca attivi superano il migliaio, di cui una mezza dozzina in Italia. A fronte di un limite pratico stimato del 20-22% per le giunzioni singole, i lavori pubblicati in letteratura riportano ormai frequentemente dispositivi di piccole dimensioni con efficienze maggiori del 12%, con un record certificato del 16,5% per celle a singola giunzione e 17,3% non certificato per celle a doppia giunzione. I moduli mostrano mediamente efficienze del 3-6%, con un valore record poco sotto il 9%. Per quanto riguarda la stabilità, durate dei dispositivi dell'ordine di cinque anni sono state già dimostrate, mentre durate di venti anni sono ritenute possibili ricorrendo ad opportuni film barriera per l'incapsulamento.
Se ci si riferisce a centri di ricerca dedicati a studi di scaling up mediante sistemi di stampa continua (roll to roll), i gruppi attivi sono dell'ordine di una decina. Un certo numero di essi hanno dato vita, negli anni, ad alcune start-up, in alcuni casi acquisite successivamente da gruppi industriali.
I principali operatori sono:

- la società tedesca Heliatek è nata dalle Università di Ulm e di Dresda, e commercializza moduli OPV basati su molecole a basso peso molecolare con processi di evaporazione sottovuoto roll to roll. Heliatek conta una sessantina di dipendenti dedicati allo sviluppo della tecnologia e negli anni ha siglato partnership con varie aziende manifatturiere. Il mercato di riferimento, inizialmente rappresentato da consumer electronics e pannelli off-grid, si sta spostando su applicazioni automotive e BIPV (building integrated PV);
- Opvius (gruppo Belectric), con sede in Germania ha rilevato le attività di Konarka, origina-

te dalle Università di Linz e di Amherst e attualmente sta indirizzarndo le attività verso lo sviluppo di prodotti. Opvius ha realizzato ad esempio lampade LED per arredamento interno, applicazioni BIPV (Expo 2015 e in paesi emergenti) e anche applicazioni industriali su larga scala;

- Asca (gruppo Armor) è localizzata in Francia e dispone di una linea produttiva per la stampa di pannelli flessibili. Ha lanciato sul mercato una serie di prodotti per elettronica di consumo e arredo urbano;
- la brasiliana Sunew, nata dal CSEM (CH), ha effettuato una serie di dimostrazioni di arredamento urbano.
- Infinity PV è l'azienda danese nata dall'attività di ricerca quindicennale della Technical University of Denmark. Essa commercializza pannelli, caricabatterie per telefoni cellulari e bici elettriche e una serie di materiali, componenti elettronici e strumenti di caratterizzazione.
- Eight19 è una società britannica che ha il suo punto di forza nel modello di business orientato ad applicazioni off-grid per paesi emergenti. La società ha siglato nel 2012 un accordo con Azuri Technology per la distribuzione di sistemi domestici alimentati da fotovoltaico tradizionale Eight19 conta di sostituire i pannelli in silicio con moduli in OPV. Dal punto di vista dello sviluppo tecnologico Eight19 non presenta soluzioni particolarmente innovative, ma si colloca come sviluppatore di sistemi.
- Eni ha avviato alcuni anni fa un progetto di ricerca e sviluppo in collaborazione con il MIT di Cambridge e con il centro di ricerche finlandese VTT, mirante a commercializzare la tecnologia in vari settori applicativi. In tempi recenti Eni e VTT hanno dimostrato la possibilità di realizzare sensori alimentati da moduli OPV con batterie integrate e hanno costruito un sistema di generazione elettrica leggero e facilmente trasportabile in zone remote o per emergenze in luoghi teatro di disastri naturali;
- Microquanta Semiconductor con sede a Hangzhou, (China), è stata aperta nel luglio del 2015, Attualmente produce celle da 6x6cm^2 con efficienza del 16%
- Solar-Tectic, presso Briarcliff Manor NY (USA) lavora su celle tandem perovskite/silicio.
- Oxford Photovoltaics, fondata nel 2010 come spin-off dell'Università di Oxford è sicuramente il gruppo più consistente in termini di attività e impegno economico sul fronte dello sviluppo delle celle a base di Perovskite essendo stati i pionieri ad aver creduto in questo materiale.
- Saule Technologies, lavora soprattutto su substrati flessibili dal 2014 presso Wroclaw (PL) e si avvale di una lunga esperienza relativa allo sviluppo di vetri testurizzati e materiali plastici per il fotovoltaico.

Accanto a queste, esistono numerose piccole aziende che commercializzano materiali: Solarmer (US/CN), 1-Materials (CA), Sunatech (CN), Brilliant Matters (CA), Raynergy Tek (TW) Ossila (GB) sono le più note.

Per quanto riguarda le Perovskiti, attualmente il record di efficienza per una cella a singola giunzione è di 25,2% a fronte di un limite teorico di 32% mentre nel caso di una cella tandem formata da una cella a base di perovskite ed una ad eterogiunzione silicio cristallino silicio amorfo

è di 28% (Oxford PV), sempre a livello di laboratorio, su area di 1 cm^2 e per tempi brevi. Da notare come questa efficienza abbia superato l'attuale record del 26,3% delle celle in silicio cristallino/silicio amorfo detenuto da Kaneka su area di 148 cm^2.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

Come stima delle risorse economiche necessarie per portare le tecnologie fotovoltaiche di nuova generazione dalla ricerca di laboratorio al mercato, si possono prendere come riferimento i finanziamenti ricevuti da una start-up del settore, Oxford PV, che impiega una quarantina di dipendenti. Oxford PV ha avuto dal 2010, anno della fondazione, al 2018 finanziamenti per circa 60 MEuro. Attualmente sta avviando una linea industriale (usata in passato dalla Bosch per pannelli CIGS) per la produzione di pannelli tandem Si/perovskite. Per le tecnologie OPV gli impegni economici sono stimabili in circa un terzo.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 21

APPLICAZIONI LARGE SCALE DEL FOTOVOLTAICO

La consapevolezza, ormai diffusa a livello globale, che gli investimenti sulle fonti rinnovabili rappresentano non più una scelta d'ideologia ecologista, ma una vera e propria necessità energetica e un'opportunità di crescita e sviluppo economico, ha fatto da traino negli ultimi anni al mercato delle fonti rinnovabili, anche alla luce del processo di transizione, in atto, del sistema energetico nazionale. La nuova potenza installata in Italia nel 2017 è stata di circa 900 MW (+15% rispetto all'anno precedente), di cui quasi la metà imputabile a impianti fotovoltaici (410 MW pari al 46% del totale installato 2017[44]). Questi numeri sono ancora più significativi se si considera l'interesse mostrato lo scorso anno dagli investitori che, considerando la strategicità delle rinnovabili nel panorama energetico mondiale, hanno destinato 13,5 miliardi di euro al settore energetico, anche se verso installazioni prevalentemente estere (potenza installata: 13,4 GW di cui 88% all'estero)[45]. Come per gli investimenti sul territorio nazionale, anche per quelli esteri, la scelta è ricaduta prevalentemente sul fotovoltaico cui è stato rivolto il 44% degli investimenti, seguito dall'eolico con il 20% e dalle applicazioni Smart Energy con il 12% del totale. Altro dato interessante, frutto della rinnovata vitalità che sta caratterizzando il settore, riguarda il ritorno all'installazione di impianti fotovoltaici di grande taglia. Dal 2013, anno in cui sono terminati i meccanismi di incentivazione del Conto Energia, fino a tutto il 2016, il settore fotovoltaico nazionale ha registrato prevalentemente l'installazione di impianti di piccola taglia che hanno aderito al meccanismo dello "scambio sul posto", portando al 20% della potenza complessiva nazionale gli impianti di taglia inferiore ai 20 kW e a 26,3 kW la taglia media degli impianti installati in Italia a fine 2016[46]. Nel 2017 si è registrata un'inversione di tendenza con un crescente interesse per gli impianti di grande taglia che hanno rappresentato il 16% dell'installato 2017 (taglia superiore a 1 MW). L'inversione di trend andrà in ogni caso confermata nei prossimi anni, risultando il dato del 2017 influenzato dalla connessione alla rete di un grande parco fotovoltaico da 63 MW a Montalto di Castro. L'impianto di Montalto ha l'obiettivo, negli intenti del fondo di investimento Octopus, artefice della realizzazione, di mostrare la sostenibilità economica del fotovoltaico di larga taglia, anche in assenza di meccanismi di incentivazione. D'altra parte, per quanto incoraggianti, i numeri fin qui descritti sono ancora lontani dalle potenze e dagli investimenti richiesti per soddisfare gli obiettivi posti dalla Strategia Energetica Nazionale, la SEN 2017[47], in base alla quale le fonti rinnovabili dovranno raggiungere al 2030, partendo dal 17,5% del 2015, una penetrazione del 28% sui consumi complessivi. Il perse-

44 Renewable Energy Report 2018 – Energy Strategy Group.

45 Rapporto Annuale Irex 2017 – Althesys.

46 Rapporto statistico "Fotovoltaico 2016" - GSE

47 Testo integrale della SEN 2017 al link: http://www.sviluppoeconomico.gov.it/images/stories/documenti/Testo-integrale-SEN-2017.pdf

guimento del suddetto target richiederebbe una triplicazione della potenza installata di fotovoltaico (+36 GW di potenza supplementare) e un raddoppio della potenza eolica (+10 GW di potenza supplementare). È evidente, quindi, che ulteriori sforzi concreti saranno richiesti alle strategie e politiche attuative nazionali a sostegno della SEN per supportare nuove realizzazioni di impianti di produzione da fonte rinnovabile che, considerati gli ambiziosi target fissati, dovranno necessariamente rivolgere una particolare attenzione anche all'installazione di impianti fotovoltaici di tipo large scale.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Nonostante la drammatica riduzione avvenuta nel corso dell'ultimo decennio c'è ancora la necessità di intervenire sull'LCOE della generazione PV per accelerare la transizione verso le energie rinnovabili. Due sono le leve su cui si hanno margini di intervento: il costo di capitale e l'aumento della producibilità. Per quanto riguarda il primo punto, sono in atto azioni di riduzione dei costi del BOS (Balance of System) e dei cosiddetti soft cost (design, manodopera per costruzione e montaggio) principalmente orientate alla digitalizzazione del progetto e alla robotizzazione delle fasi di costruzione e montaggio. Per quanto riguarda l'aumento della producibilità, il gap tra rendimento pratico e teorico della conversione PV lascia molto spazio di miglioramento, ed inoltre si ritiene di poter ridurre ancora il costo specifico del pannello e di poterne aumentare la vita utile. Ad esempio, si stima che un dimezzamento dell'LCOE sia raggiungibile nel prossimo quinquennio attraverso l'aumento del production rate annuale (+39%), allungamento del tempo di vita (+40%), riduzione del costo specifico (-25%), il tutto grazie alla implementazione della tecnologia HJT bifacciale (progetto GOPV "Global Optimization of integrated PhotoVoltaics system for low electricity cost" finanziato in ambito H2020). Ovviamente si tratta di una delle possibili soluzioni percorribili. Nello sviluppo dei nuovi concept si dovrà inoltre tenere conto dell'utilizzo dei materiali (es. argento) la cui scarsa disponibilità e conseguente incremento di prezzo, potrebbe diventare nel futuro un bottleneck all'espansione del mercato del PV. Per l'industria italiana la prevista costante espansione del mercato del PV a livello internazionale (CAGR(20-25) 7-17%; CAGR(20-30) 6-14%) può rappresentare sicuramente una congiuntura favorevole di espansione e/o conquista di nuovi segmenti di business lungo la catena del valore, dopo anni di predominio nelle fabbricazioni dei moduli e componenti della Cina e del sud-est asiatico. Il posizionamento su tecnologie premium ad alta efficienza diventa quindi cruciale sia nella fabbricazione dei componenti, sistemi e sottosistemi, sia nell'installazione ed eventuale successiva cessione di impianti in Italia e all'estero. Un esempio di questa strategia è il programma industriale sulla tecnologia eterogiunzione HJT bifacciale ad alta efficienza di Enel Green Power (EGP) e dalla sua fabbrica di moduli 3SUN di Catania.

Innovazione tecnologica

La ricerca di soluzioni tecnologiche e di sistema ha consentito negli ultimi venti anni di attrarre investimenti nel settore del fotovoltaico, a livello globale, sia pubblico che privato. Molteplici linee di ricerca, ascrivibili principalmente ai seguenti obiettivi, sono state perseguite:

- **Riduzione del costo**

Le economie di scala e i miglioramenti tecnologici hanno comportato una forte riduzione dei

costi del fotovoltaico nel tempo. Secondo dati del Fraunhofer[48], il prezzo dei moduli fotovoltaici è diminuito negli ultimi 36 anni del 24% per ogni raddoppio della produzione cumulativa mondiale. In generale, il costo dei moduli ha un peso rilevante sul costo totale dell'impianto, rappresentando circa la metà[49] del costo totale nel caso degli impianti large scale con potenza maggiore di 1 MWp e un terzo circa per gli impianti di tipo residenziale con potenza di 3 kWp. È evidente, quindi, che riduzioni di costo dei moduli hanno un impatto più rilevante sugli impianti di grandi dimensioni il cui costo medio, a riprova di quanto precedentemente affermato, è sceso nel 2017 al di sotto della soglia dei 1.000 €/kWp (800 €/kWp per potenze superiori a 1 MWp; 1.300 €/kWp per potenze comprese nella fascia 200 kWp – 1 MWp; 1.500 €/kWp per potenze comprese nella fascia 20-200 kWp; 2.000 €/kWp per potenze al di sotto dei 20 kWp).

Data l'importanza della "leva" prezzo per l'espansione del mercato fotovoltaico, numerosi programmi di ricerca in tutto il mondo si sono focalizzati sull'individuazione di nuovi materiali e tecnologie costruttive più efficienti e volte a favorire il raggiungimento di un costo del kWh da fonte solare comparabile con quello da fonte convenzionale, anche in assenza di incentivi governativi e in siti con livelli medi di irraggiamento solare annuo.

Con queste finalità e in un'ottica di rilancio della filiera industriale connessa al solare fotovoltaico in Europa – ad oggi in sofferenza per la concorrenza dei mercati asiatici – molteplici progetti sono stati finanziati nell'ambito del programma UE di ricerca e innovazione Horizon 2020. A titolo di esempio, il progetto "AMPERE - Automated photovoltaic cell and Module industrial Production to regain and secure European Renewable Energy market" – finanziato con 14 milioni di euro da Horizon 2020 – prevede di convertire l'attuale produzione 3SUN di celle tandem con strati di silicio amorfo e micro-cristallino in produzione di celle a etero-giunzione con film sottilissimi di silicio amorfo di 10-15 nanometri che garantiscano un'efficienza del 23% circa (comparabile con l'efficienza di cella del prodotto analogo della Panasonic, unico produttore al mondo di questa tipologia di prodotto). Le celle prodotte dovranno garantire una maggiore resa energetica complessiva e un minor costo rispetto a quelle Panasonic, per effetto di un miglior livello di captazione della luce solare diffusa, dell'utilizzo di metalli meno costosi negli elettrodi e nelle connessioni delle singole celle e di una minore quantità di silicio presente nella cella (strati più sottili e minori sprechi di materiale).

- **Incremento dell'efficienza**

Grazie all'innovazione tecnologica, negli ultimi dieci anni si è registrato un sostanziale incremento delle performance dei moduli fotovoltaici sia per applicazioni di ricerca che commerciali. L'attuale valore teorico di efficienza massima, raggiunto in laboratorio con pannelli in silicio monocristallino, si aggira intorno al 29% contro un valore del 21% dei prodotti commerciali tipicamente utilizzati per applicazioni di tipo large scale. Questo valore di efficienza si riduce al 12-17% per i pannelli in silicio policristallino (che in applicazioni di laboratorio raggiungono valori del 21,9%) o

48 PHOTOVOLTAICS REPORT – Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE with support of PSE Conferences & Consulting GmbH disponibile al link https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf (2017)

49 Il costo di un impianto fotovoltaico – dati da www.enerpoint.it

al 9%-16% per i moduli CdTe (valori massimi in laboratorio del 21%), tipicamente utilizzati per impianti di taglia inferiore. Ricercatori della società giapponese Kaneka Corporation, nell'ambito di un progetto finanziato da NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization) sono riusciti, a fine 2016, a mettere a punto una cella solare con tasso di conversione energia solare/energia elettrica del 26%[50] circa. Sfruttando avanzate tecniche di eterogiunzione proprietarie, lo studio condotto ha dimostrato la possibilità di raggiungere valori prossimi al limite teorico di efficienza. È evidente che nel futuro la ricerca proseguirà per raggiungere tali valori anche nelle applicazioni commerciali, non perdendo di vista la necessità di realizzare dispositivi che siano in grado di assicurare un adeguato trade-off tra efficienza e costi di produzione. Si ritiene, infine, utile specificare che l'incremento di efficienza ha consentito, nel tempo, di ridurre di quasi un terzo la quantità di materiale utilizzato per la fabbricazione delle celle che è, infatti, passata, negli ultimi dieci anni, da 16 g/Wp a meno di 6 g/Wp4.

- **Materiali innovativi**

Come facilmente intuibile, la ricerca di materiali in grado di far "avvicinare" il fotovoltaico alla cosiddetta grid parity ha sicuramente influenzato i programmi di ricerca sui materiali innovativi degli ultimi venti anni, ponendo l'attenzione sul perseguimento degli obiettivi di minimizzazione dei costi e incremento dell'efficienza. Parallelamente, tali studi hanno portato anche a individuare materiali fotovoltaici alternativi al silicio, che consentissero di far fronte ad un'eventuale scarsità di materie prime in futuro. Particolarmente degna di menzione, in tal senso, è la perovskite, cristallo minerale fotosensibile. La possibilità di impiegare materiali a struttura perovskitica per lo strato attivo dei pannelli fotovoltaici ha ultimamente suscitato grande interesse da parte della comunità scientifica internazionale. Le celle a base di perovskite, infatti, hanno mostrato, su scala laboratorio, valori di efficienza di conversione comparabili con quelli delle celle al silicio (circa 22%), ma con strati di minerale molto più sottili (~300 nanometri[51]) che rendono le celle più facilmente lavorabili, con costi unitari di produzione inferiori e tecnologie di lavorazione alternative. Uno studio[52] del team di ricerca del laboratorio AFRL (Air Force Research Laboratory) dimostra, ad esempio, che il ridotto spessore e le proprietà strutturali della perovskite consentono la realizzazione di moduli fotovoltaici mediante stampa 3D[53], ossia un processo estremamente economico per produzioni su larga scala. Altro aspetto di grande interesse nello studio di nuovi materiali per applicazioni fotovoltaiche riguarda la ricerca di soluzioni che offrano opportunità di integrazione architettonica a livelli di costo sostenibile. L'evoluzione dalla struttura "tradizionale" del modulo fotovoltaico verso design evoluti, con un confrontabile grado

50 http://www.kaneka.co.jp/en/images/topics/1473811995/1473811995_101.pdf.

51 Progetto GOTSolar.

52 Santanu Bag, James R. Deneault, Michael F. Durstock, "Aerosol Jet Assisted Thin Film Growth of CH3NH3PbI3 Perovskites—A Means to Achieve High Quality, Defect Free Films for Efficient Solar Cells", Advanced Energy Materials, 14 Luglio 2017, https://doi.org/10.1002/aenm.201701151.

53 La peroxite può essere dispersa, tramite un trattamento con onde ultrasoniche, in goccioline di aerosol; queste ultime, utilizzate sotto forma di spruzzo aerosol-jet in una stampante 3D, possono ricoprire la superficie fino ad ottenere celle solari con un'efficienza del 15,4%.

di efficienza, potrebbe aprire la strada a scenari che oggi appaiono ancora distanti. Gli impianti di grandi dimensioni, generalmente installati "a terra" per ovvie ragioni di semplicità realizzativa ed economicità, in futuro potrebbero essere integrati architettonicamente nell'edilizia industriale e residenziale. L'utilizzo di vernici solari o vetri fotovoltaici per le finestre degli edifici[54], ad esempio, integrati in strutture di dimensioni rilevanti quali i grattacieli, potrebbero consentire di realizzare vere e proprie centrali fotovoltaiche large scale in ambito residenziale. Progettazioni di questo tipo, con l'utilizzo di moduli fotovoltaici commerciali in silicio, non sono in realtà una novità, seppur rappresentino un'applicazione di nicchia per l'elevato costo realizzativo e manutentivo. Nel 2016, con l'obiettivo di realizzare un edificio indipendente dal punto di vista energetico, la Peddle Thorp Architects ha realizzato il progetto del grattacielo Sol Invictus Tower, edificio di 60 piani per un totale di 520 appartamenti, completamente rivestito di moduli fotovoltaici. Sol Invictus Tower, in costruzione nei prossimi anni a Melbourne in Australia, grazie ad una facciata da 3.000 m^2 rivestita completamente di pannelli solari e un impianto da 300 m^2 sul tetto, coprirà il 50% del fabbisogno energetico dell'edificio, valore che può salire al 100% con l'integrazione di un appropriato sistema di accumulo elettrico.

Performance Ratio e prestazioni degli impianti

Il Performance Ratio (PR), indice che "evidenzia l'effetto complessivo delle perdite sull'energia prodotta in c.a. dall'impianto fotovoltaico, dovute alla temperatura dei moduli, allo sfruttamento incompleto della radiazione solare, al rendimento di conversione dell'inverter e alle inefficienze o guasti dei componenti (inclusi il disaccoppiamento fra le stringhe e gli eventuali ombreggiamenti sui moduli)"[55], ha incrementato negli anni il suo valore grazie ai miglioramenti tecnologici della componentistica base degli impianti (es. maggiore affidabilità degli inverter, algoritmi più efficienti per l'inseguimento del punto di massima potenza – MPPT, ecc.) e all'accrescimento dell'esperienza degli installatori, che ha notevolmente ridotto gli errori in fase di installazione dell'impianto. Valori attuali di PR in un impianto fotovoltaico operante in condizioni ottimali si attestano intorno all'80÷85%[56]. Il PR medio annuo per gli impianti fotovoltaici italiani, negli anni 2011-2015, si è attestato intorno al 74%, evidenziando livelli prestazionali soddisfacenti ma inferiori ai valori ottimali[57]. Tali scostamenti percentuali, apparentemente irrisori, si traducono in differenze di produzione di qualche TWh che potrebbero divenire significative con l'incremento della potenza fotovoltaica installata attesa nei prossimi anni. In aggiunta al fisiologico degrado delle prestazioni, principale causa di perdita della produzione energetica, l'assenza di manutenzione rappresenta un fattore rilevante di attenzione. Frequentemente, infatti, a valle dell'installazione, non sono previsti per gli impianti sia di grandi che piccole dimensioni (sebbene il fenomeno sia più comune negli impian-

54 La perovskite, ad esempio, per le sue caratteristiche fisico-chimiche consente di ottenere strati semitrasparenti e flessibili, utilizzabili per la realizzazione di vetri.

55 Norma CEI EN 61724

56 Task 13 - Performance and Reliability of Photovoltaic Systems (www.iea-pvps.org)
Rivista CEI Magazine di Novembre-Dicembre 2016.

57 D. Bertani, S. Guastella, G. Maugeri, C. Rosito, "I sistemi di generazione fotovoltaica: monitoraggio, diagnostica, gestione e prestazioni dopo vari anni di esercizi." Rapporto RSE 16002359. (2015)

ti non di tipo "Utility Scale"), interventi di manutenzione ordinaria e/o straordinaria. In linea con quanto già accade per gli impianti industriali tradizionali, ad integrazione delle procedure di installazione, andrebbe prevista, anche per gli impianti fotovoltaici, una "procedura di manutenzione" a cui far riferimento durante la vita utile dell'impianto. In base a dati sperimentali e studi relativi alla specifica tematica, va quindi ricercata una metodologia e definita una procedura che, per macroclassi di dimensione dell'impianto, individui:

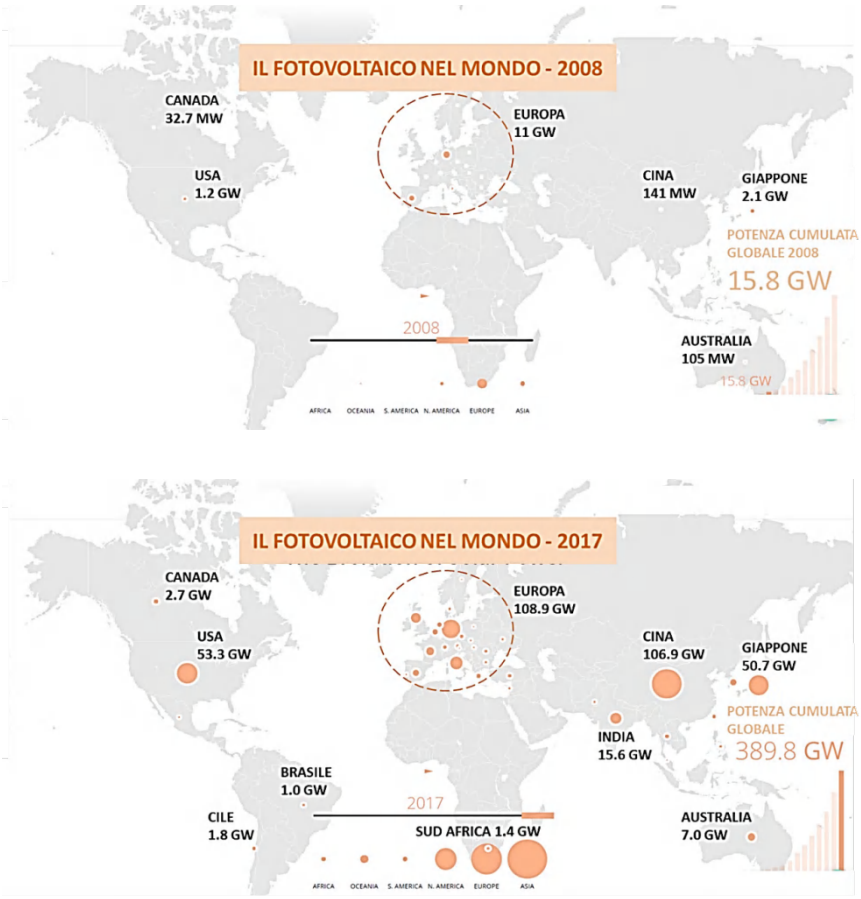
- parametri di riferimento da controllare come indicatori del corretto funzionamento del processo di produzione (es. produzione attesa in funzione dell'età dell'impianto);
- intervalli temporali di verifica del sistema;
- interventi da operare per un'efficace manutenzione ordinaria (es. interventi periodici di pulizia del sistema);
- possibilità di maggior ricorso all'automazione, intesa sia come strumento per facilitare le operazioni di manutenzione (es. robot di pulizia) che per la rilevazione di eventuali criticità (es. rilevamento automatico dei parametri di controllo via software), mediante funzionalità di diagnostica avanzata.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

La congiuntura economica internazionale che ha rallentato il settore dell'industria negli ultimi dieci anni, non ha parimenti frenato la crescita mondiale nel settore delle rinnovabili e, in particolare, del fotovoltaico. Come evidente dalla Figura 1, la potenza fotovoltaica installata a livello mondiale al 2017, è cresciuta di più di venti volte rispetto all'installato di dieci anni prima. Grazie alla Cina, che ha dato un forte impulso alla crescita del settore fotovoltaico negli ultimi anni[58], per la prima volta, nel 2016, la crescita in termini di potenza installata di una fonte rinnovabile (solare fotovoltaico) ha sorpassato il tasso di crescita annuo dei combustibili convenzionali[59]. Noti gli indirizzi strategici delle principali potenze mondiali in tema di energie rinnovabili e gli incoraggianti tassi di crescita, la IEA ha stimato una potenza installata da fonti rinnovabili, a livello mondiale, di 920 GW al 2022, corrispondenti ad una stima di crescita del 43%, prevalentemente attribuibile all'incremento atteso della potenza fotovoltaica installata. Secondo le stime IEA, Cina e India, che hanno inserito nei loro piani di sviluppo la decarbonizzazione come elemento prioritario, guideranno la crescita mondiale. La continua riduzione dei costi tecnologici e il meccanismo dell'asta, che ha preso campo solo negli ultimi anni nel continente europeo, e che è ancora parzialmente ancorato al meccanismo dell'incentivo governativo, condurranno, secondo gli esperti della IEA, a costi unitari del chilowattora prodotto da fotovoltaico più competitivi di quelli del carbone, innescando un meccanismo virtuoso di nuovi investimenti nel settore energetico delle rinnovabili.

58 L'incremento di potenza fotovoltaica installata dalla Cina nel 2016 è pari alla metà dell'incremento a livello globale.

59 Report IEA Renewables2017 (https://www.iea.org/publications/renewables2017/)



Fonte: rielaborazione ENEA su mappa interattiva Greenbyte
http://www.greenbyte.com/resources/evolution-of-solar-power/

FIGURA 1. IL FOTOVOLTAICO NEL MONDO: CONFRONTO 2008-2017

Gli ambiziosi target di crescita fissati dalle politiche governative dei singoli Stati in questi ultimi anni (SEN 2017 in Italia, Renewable Energy Directive dell'UE, Piano quinquennale della Cina 2016, Vision 2030 in Arabia Saudita, etc.) non possono certamente essere raggiunti soltanto con investimenti nel settore residenziale, ma richiedono necessariamente un forte ampliamento del settore della generazione "large scale". Ottenere quantità di energia equiparabili o vicine a quelle generate dalle centrali termoelettriche convenzionali, infatti, richiede la realizzazione di vere e proprie centrali fotovoltaiche, alcune delle quali sono già operative da qualche anno, mentre altre sono in fase progettuale o di realizzazione. Proprio in questi mesi, ad esempio, la società giapponese SoftBank ha annunciato la firma di un memorandum d'intesa con l'Arabia Saudita per la realizzazione, entro il 2030, della più grande centrale fotovoltaica al mondo. L'impianto, con una capacità di 200 GW (ovvero il 50% dell'attuale capacità fotovoltaica installata a livello mondiale)

sorgerà nel deserto saudita, una delle zone al mondo più favorevoli in termini di irraggiamento solare. La centrale, per la quale si stima un investimento da 200 miliardi di dollari, integrerà sistemi di accumulo e la realizzazione di una fabbrica per la produzione locale di componentistica, tra cui gli stessi moduli fotovoltaici. Tra le centrali solari fotovoltaiche, già operative, di dimensioni maggiori si possono annoverare:

1. **Shakti Sthala**: centrale solare fotovoltaica da 2 GW a Pavagada in India. L'impianto, costituito da 8 lotti da 250 MW ciascuno, occupa circa 5.320 ettari (circa 53 km^2) e sorge in una delle aree più aride dell'India. L'impianto, costato circa 2,53 miliardi di dollari, ha consentito anche la valorizzazione di un'area non più idonea all'agricoltura per l'estrema aridità, da cui più di 10.000 persone sono state costrette a migrare negli ultimi cinquanta anni. Grazie alla presenza della centrale, gli agricoltori, proprietari dei terreni, possono oggi contare su un reddito alternativo corrispondente al compenso annuo per la concessione in leasing, senza perdere il titolo di proprietà del terreno. Della formula del leasing, ovviamente, beneficiano anche gli investitori che possono spalmare nel tempo i costi del terreno;
2. **Tengger Desert Solar Park**: centrale solare fotovoltaica a Zhongwei in Cina, nota come "The Great Wall of Solar"; questo parco solare, con una potenza totale di 1,5 GW, si estende per circa 37 km^2 nel deserto di Tengger, localizzato nella regione autonoma della Mongolia Interna;
3. **Gujarat Solar Park**: centrale fotovoltaica da 856 MW in India. Costituita da 46 parchi fotovoltaici, si estende per un'area di circa 2.000 ettari (circa 20 km^2) ed è operativa dal 2011-2012;
4. **Longyangxia Hydro-solar PV Station**: centrale fotovoltaica da 850 MW in Cina. La centrale di Longyangxia rappresenta il più grande impianto della Cina e ricopre un'area di circa 23 km^2. Il parco solare è accoppiato a una centrale idroelettrica che funge da sistema di regolazione, consentendo di bilanciare la produzione da fonte solare prima dell'invio alla rete elettrica e di accumulare la sovrapproduzione da solare in caso di eccedenza rispetto alle richieste della rete;
5. **Solar Star**: centrale fotovoltaica da 579 MW, completata nel 2015 in California. L'impianto, composto da 1,7 milioni di pannelli fotovoltaici, si estende per circa 13 km^2;
6. **Topaz Solar Farm**: centrale fotovoltaica da 550 MW, completata nel 2014 in California. L'impianto, composto da 9 milioni di moduli fotovoltaici a film sottile CdTe è costato 2,5 miliardi di dollari e si estende per circa 25 km^2.

Degno di menzione risulta anche il progetto proposto dalla Lyon Group, azienda australiana operante nel settore energetico. La società, infatti, ha annunciato, lo scorso anno, la realizzazione della centrale fotovoltaica con il più grande sistema di accumulo energetico al mondo. L'impianto fotovoltaico, realizzato con circa 3,4 milioni di moduli fotovoltaici nel Sud del Paese, avrà una potenza di 330 MW e un sistema di accumulo di tipo elettrochimico costituito da circa un milione di batterie, per un totale di energia compreso tra i 100 e i 400 MWh, in funzione della specifica configurazione. Il costo stimato dell'intero progetto si aggira intorno ai 700 milioni di dollari.
Il titolo di impianto solare fotovoltaico più grande d'Europa va alla centrale francese Constantine a Cestas, nei pressi di Bordeaux. Constantine, che si estende per circa 250 ettari, garantisce una potenza nominale di 300 MW ed ha richiesto un investimento di 360 milioni di euro. Su valori di

potenza di un ordine di grandezza inferiore, si attestano le capacità delle più grandi centrali solari fotovoltaiche italiane, il cui primato, per potenza, va attualmente alla Centrale di Montalto di Castro con 63 MW. Quest'ultima, connessa alla rete nel 2017, è costituita da 5 impianti fotovoltaici, realizzati con complessivi 197.000 moduli fotovoltaici. La centrale di Montalto rappresenta anche il primo progetto large scale italiano in grid parity, senza sussidi.

L'assenza di grandi centrali solari in Italia, si accompagna ad un mercato fotovoltaico prevalentemente di piccola taglia e rivolto ad impianti ad uso domestico. Pur risultando tra le nazioni dell'Unione Europea a maggior potenza installata di fotovoltaico[60], l'Italia presenta la minor percentuale di impianti "utility scale". Gli impianti italiani con potenza superiore ad 1 MW rappresentano, infatti, appena il 6% della potenza fotovoltaica installata (la loro installazione risale prevalentemente al periodo di validità del Conto Energia), contro il 28% della Germania, il 40% della Francia e il 67% del Regno Unito[61]. Una così ridotta quota di impianti large scale in Italia è da ricercarsi non soltanto in motivazioni di natura geografica (aspetti orografici) ed economica, connesse alla sostenibilità dell'investimento – oggi ampiamente raggiungibile grazie al decremento dei costi tecnologici – ma anche alle difficoltà di tipo burocratico connesse agli iter autorizzativi, percepiti come lunghi e complessi dai principali player del mercato oltre che, in taluni casi, altamente limitanti. In tal senso, ad esempio, l'attuale normativa, a tutela del paesaggio, non consente l'accesso ai meccanismi di supporto all'investimento agli impianti a terra installati su suoli classificati come agricoli, anche se non coltivati, limitando notevolmente l'individuazione di potenziali siti di installazione.

Pertanto, per un concreto sviluppo del settore fotovoltaico italiano large scale sarà fondamentale prevedere decreti attuativi della SEN2017 basati su un'effettiva semplificazione dei processi autorizzativi connessi sia all'installazione di nuovi impianti che al revamping/repowering degli esistenti. Relativamente ai nuovi impianti, un reale stimolo alla crescita dovrà necessariamente passare da una facilitazione nell'individuazione dei siti di installazione nonché da politiche di incentivazione, con meccanismi di supporto concreto, allo sfruttamento delle aree industriali dismesse, capannoni e tetti, indicati dalla SEN come siti prioritari per le nuove installazioni. In tal senso, si stima che le aree industriali di potenziale interesse ammontino a circa 130 km^2 [62] e che, ad esse, potrebbero aggiungersi le aree demaniali demilitarizzate, le cave dismesse, i bacini delle dighe, ottenendo così il duplice beneficio connesso alla valorizzazione di un asset oggi in disuso (come accaduto per i terreni adoperati in Cina per l'impianto Shakti Sthala) e la contemporanea espansione del mercato delle rinnovabili. L'esperienza internazionale, infine, ci mostra che il decollo del settore del large scale richiede il ricorso ad appalti concorrenziali mediante l'introduzione di aste tecnologicamente neutrali, come sta accadendo in Germania o nel Regno Unito, sia per sopperire all'impossibilità di erogare ulteriori sovvenzioni governative

60 Il 75% della potenza fotovoltaica installata nell'Unione Europea (110 GW) è ascrivibile a 4 nazioni: Germania (43 GW), Italia (19,7 GW), UK (12,6 GW) e Francia (7,7 GW).

61 L'elevato valore di penetrazione di impianti utility scale nel Regno Unito è giustificato dalla presenza di un meccanismo incentivante specifico per progetti large scale (P<5MW): Renewables Obligation Certificate (ROC). Le installazioni large scale sono nettamente diminuite nel 2017, a seguito della fine del ROC nel 1026.

62 "Gli impetuosi numeri del fotovoltaico nel mondo e i presupposti per un rilancio in Italia. L'impressionante incremento di potenza del fotovoltaico" articolo di Giovanni Silvestrini su qualenergia.it (2017)

che per remunerare i "curtailment" forzati delle centrali, necessari a prevenire potenziali problemi di instabilità nelle reti elettriche in caso di sovraproduzione localizzata in sezioni critiche[63]. Analogamente, un ulteriore stimolo alla crescita del mercato potrebbe essere assicurato dall'apertura delle centrali solari fotovoltaiche large scale all'offerta di servizi remunerati di bilanciamento alla rete, anche mediante il supporto di sistemi di accumulo.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

Il settore del fotovoltaico italiano large scale, come discusso nei precedenti paragrafi, presenta notevoli margini di crescita e numerosi sono i segnali di interesse da parte dei diversi soggetti a vario titolo e livello connessi alla filiera di settore. Come stimato dal Renewable Energy Report 2018 dell'Energy Strategy Group, gli ambiziosi obiettivi indicati nella SEN2017 sono raggiungibili a fronte di un investimento di circa 60 miliardi di euro (ovvero circa 4,6 miliardi di euro annui contro gli 1,6 miliardi di euro del 2017) suddivisi tra installazioni large scale (+13 GW al 2030) e impianti di piccola taglia (+23 GW al 2030).

63 Benjamin Attia, Manan Parikh, Tom Heggarty, "Global Solar Demand Monitor: Q2 2017"

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 22

SOLARE TERMICO A CONCENTRAZIONE E IBRIDIZZAZIONE

Gli impianti solari termici a concentrazione, attraverso sistemi di specchi, concentrano la radiazione solare su di un ricevitore convertendola in energia termica ad alta temperatura. Il calore prodotto viene raccolto da un fluido termovettore e può essere utilizzato per produrre vapore ad alta temperatura che, inviato ad una turbina, permette di generare elettricità (STE – solar thermal electricity) analogamente a quanto avviene nelle centrali termoelettriche convenzionali; in questo caso si parla di solare termodinamico o CSP (concentrating solar power). In alternativa, l'energia termica prodotta dal campo solare può essere utilizzata per altre applicazioni, come la fornitura di calore di processo industriale (SHIP – solar heat for industrial processes), il riscaldamento/raffrescamento residenziale (SHC – solar heating and cooling), la produzione di combustibili solari, la dissalazione dell'acqua; in questi casi la tecnologia viene genericamente definita CST (concentrating solar thermal).

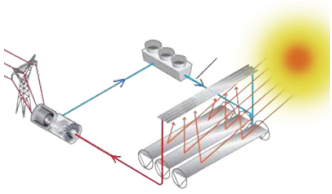
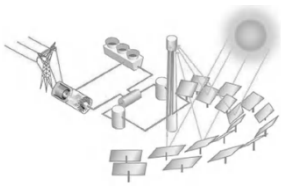
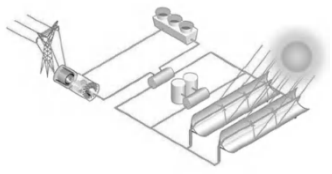
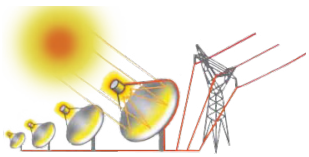
Un'importante caratteristica della tecnologia solare a concentrazione consiste nella possibilità di integrare l'impianto solare con un sistema di stoccaggio dell'energia termica (TES – thermal energy storage), permettendo di disaccoppiare la fase di produzione di energia termica da quella di conversione in energia elettrica: ciò rende di fatto l'energia prodotta dispacciabile, cioè modulabile in base alle richieste della rete, consentendo persino la produzione in assenza di radiazione solare. A differenza dei sistemi fotovoltaici o eolici, in cui l'immagazzinamento di energia elettrica rappresenta ancora un costo troppo elevato ed è realizzabile solo per poche ore, l'abbinamento di un sistema TES, con capacità di stoccaggio dalle 7 alle 15 ore, ad un impianto CSP è oggi una pratica consolidata. Un'altra peculiarità fondamentale della tecnologia è rappresentata dalla possibilità di ibridizzazione/integrazione con altre fonti di calore sia fossili che rinnovabili come le biomasse. Nel caso ad esempio di integrazione con centrali convenzionali, l'impianto solare condivide la sezione di potenza contribuendo alla sua alimentazione.

Tuttavia, mentre i moduli fotovoltaici utilizzano entrambe le componenti della radiazione solare, diffusa e diretta, gli impianti CSP sfruttano solo quella diretta. Risulta perciò che le regioni più adatte all'applicazione della tecnologia CSP sono le regioni subtropicali e le località ad elevata altitudine, dove la diffusione della luce solare è molto bassa; la fascia equatoriale, nonostante la favorevole inclinazione dei raggi solari è spesso caratterizzata da regimi climatici molto piovosi e per questo meno adatti. In generale sono considerate adatte le zone che possiedono una DNI[64] (direct normal irradiance) superiore a 2000 kWh/m^2/a. Tra le migliori zone si possono

64 https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.10.001. Direct normal irradiance related definitions and applications: The circumsolar issue; Solar Energy, Volume 110, 2014, pp. 561-577.

menzionare il Nord e Sud Africa, il Medioriente, il Nord Ovest dell'India, il Sud Ovest degli USA, l'Australia, il Sud Europa ed infine il Cile, dove la DNI raggiunge i valori più alti al mondo, avvicinandosi ai 3000 kWh/m^2/a.

Attualmente la capacità totale installata nel mondo raggiunge quasi i 5 GW[65]. Circa il 46% degli impianti operativi si trovano in Spagna mentre il 36% sono in USA. Negli ultimi 3 anni, l'interesse si è rivolto verso nuovi mercati come Sud Africa, Marocco, Cile e Cina grazie alle buone condizioni di irraggiamento solare e alle politiche favorevoli.

TIPO DI CONCENTRAZIONE **TIPO DI RICEVITORE**	**CONCENTRAZIONE LINEARE** I collettori inseguono il sole su un solo asse e concentrano la radiazione su un ricevitore lineare	**CONCENTRAZIONE PUNTUALE** I collettori inseguono il sole su due assi e concentrano la radiazione in un singolo ricevitore puntuale
FISSO I ricevitori fissi sono dispositivi stazionari indipendenti dal sistema di concentrazione dell'impianto	**RIFLETTORI LINEARI DI FRESNEL** 	**RICEVITORE CENTRALE/TORRE SOLARE** 
MOBILE I ricevitori mobili si spostano insieme al sistema di concentrazione	Collettori parabolici lineari 	**DISCO PARABOLICO/MOTORE** 

Esistono diverse tecnologie CSP che si differenziano nel modo di concentrare e raccogliere la radiazione solare per convertirla in calore a media o alta temperatura. In particolare, le tecnologie che si basano su sistemi a concentrazione lineare, come i collettori parabolici lineari (PT – parabolic trough) e i riflettori lineari di Fresnel (LFR – linear Fresnel reflector), utilizzano geometrie differenti di specchi per focalizzare l'energia solare su una linea, raggiungendo temperature massime di circa 600°C (fattore di concentrazione circa 100).

65 Analisi dei dati degli autori da fonti: CSP Today Global Tracker & https://www.nrel.gov/csp/solarpaces/index.cfm.

I sistemi a ricevitore centrale (CR – central receiver), anche detti torri solari (ST – solar tower) e a disco parabolico invece, concentrando la radiazione solare in un punto, raggiungono fattori di concentrazione di circa 1000 con temperature che possono superare i 1000°C.
Ad oggi, la tecnologia a collettori parabolici lineari è quella più impiegata e quindi matura: rappresenta l'84% della capacità commerciale esistente (4.2 GW). Dati estratti da CSP Today Global Tracker[66] indicano comunque che il 45% della capacità globale in costruzione, e circa il 70% di quella relativa ai progetti in fase di sviluppo considerano l'impiego della tecnologia a torre. Anche l'interesse per la tecnologia Fresnel sta aumentando, mentre i sistemi a disco parabolico, pur consentendo elevati rendimenti anche su taglie ridotte, hanno difficoltà ad affermarsi a causa della necessità di motori tipo Stirling o Brayton sviluppati ad hoc e della non facile integrazione con un sistema di stoccaggio dell'energia termica.
Di seguito vengono analizzate le caratteristiche delle tre principali tecnologie.

Collettori parabolici lineari

La tecnologia PT utilizza specchi di forma parabolica allineati a formare file e loop per concentrare la radiazione solare sulla linea focale dove è posizionato il tubo ricevitore in cui fluisce un fluido termovettore (HTF – heat transfer fluid). Grazie all'energia solare, il fluido viene portato ad alta temperatura e quindi pompato attraverso una serie di scambiatori di calore per produrre vapore surriscaldato. Il vapore a sua volta viene convertito in energia elettrica grazie ad una turbina/generatore in un ciclo termodinamico convenzionale a vapore.

I fluidi termovettori più ampiamente impiegati sono olii sintetici che presentano una temperatura massima operativa di circa 400°C, dovuta alla tensione di vapore e all'instabilità termica del fluido stesso. Tale temperatura massima limita l'efficienza di conversione della turbina, e la ricerca negli ultimi anni è stata focalizzata sullo sviluppo di HTF che permettessero di operare a temperature fino a 600°C. Tra questi, significativi sono la generazione di vapore diretta ed il surriscaldamento nei tubi ricevitori e, soprattutto, l'uso di miscele di sali fusi. Il primo impianto dimostrativo (5 MWe equivalenti) che utilizza sali fusi come HTF è stato realizzato a Priolo Gargallo (Italia) da Enel ed è basato sul lavoro di sviluppo effettuato da ENEA. Oltre ad incrementare l'efficienza complessiva dell'impianto solare, l'uso dei sali fusi permette di ridurre nel contempo le problematiche di sicurezza (dovute all'infiammabilità) e di impatto ambientale tipiche dell'olio sintetico. Diversi gruppi italiani ed internazionali sono attivi su questa linea di ricerca per individuare nuove formulazioni di sali fusi, caratterizzate da bassi punti di fusione ed opportune proprietà termofisiche, con l'obiettivo di minimizzare il rischio di congelamento e le dispersioni termiche. Al momento non è però ancora stata sviluppata una sufficiente esperienza operativa che permetta di considerare maturo l'uso di queste miscele di sali in sistemi a concentrazione lineare.

Ricevitori centrali

Gli impianti a ricevitore centrale utilizzano una serie di specchi, detti eliostati, che, inseguendo individualmente il sole su due assi, focalizzano la radiazione solare su un unico ricevitore, tipica-

66 http://tracker.newenergyupdate.com/tracker/projects. Marzo 2018

mente posto sulla sommità di una torre alta dalle decine alle centinaia di metri. Il fluido termovettore scorre all'interno del ricevitore ed assorbe l'energia solare concentrata sotto forma di energia termica. A seconda dell'HTF impiegato e della tipologia di ricevitore, è possibile raggiungere temperature di 300°C-550°C, nel caso di uso di acqua/vapore, di 565°C con l'uso di sali fusi ed oltre i 700°C utilizzando aria. La temperatura massima raggiungibile determina le condizioni operative (subcritiche, supercritiche o ultra-supercritiche) del ciclo a vapore nell'impianto di potenza convenzionale a valle. È possibile anche impiegare gas come HTF e in questo caso le temperature massime raggiungibili sono dell'ordine dei 1000°C e il fluido gassoso può essere inviato direttamente ad una turbina a gas.
Attualmente le migliori prestazioni sono raggiungibili con i sali fusi a 565°C impiegati sia come HTF che come fluido di stoccaggio termico. È possibile infatti produrre vapore da inviare ad un ciclo supercritico efficiente e nello stesso tempo ridurre la quantità di sale necessaria per lo stoccaggio grazie ai più elevati intervalli di temperatura a cui opera l'impianto rispetto alla tecnologia PT basata su olii sintetici. Ne consegue una significativa riduzione di costi, che rende economicamente sostenibili capacità di stoccaggio fino a 15 ore di funzionamento a pieno carico della turbina. Con le opportune condizioni meteorologiche, sarebbe quindi possibile operare l'impianto in una tale configurazione 24 ore/giorno 7 giorni alla settimana in estate e a carico parziale in inverno, raggiungendo una copertura della produzione da solare di circa il 50%.

Riflettori lineari Fresnel

Un sistema a concentrazione lineare di Fresnel è costituito da file di specchi lineari pressoché piani disposti tra loro parallelamente che concentrano la luce solare su di un tubo ricevitore fisso montato al di sopra degli specchi. Per migliorare l'efficienza ottica può essere presente un riflettore secondario al di sopra del tubo ricevitore che reindirizza su di esso i raggi non perfettamente collimati dagli specchi primari. Il fluido termovettore normalmente utilizzato è acqua che viene trasformata in vapore direttamente all'interno del tubo ricevitore. Attualmente le temperature operative massime (circa 300°C) sono inferiori a quelle delle altre tecnologie così come l'efficienza complessiva. Tali minori prestazioni sono però in parte compensate da minori costi operativi e di investimento, che rendono la tecnologia adatta in particolare ad applicazioni termiche come il riscaldamento/raffrescamento o la produzione di calore per processi industriali.
Recentemente è stata dimostrata la possibilità di innalzare la temperatura di lavoro fino a 380°C con produzione di vapore maggiormente surriscaldato e quindi maggiore efficienza complessiva di conversione termico-elettrico. Sono allo studio ulteriori soluzioni per raggiungere i 450–500°C, permettendo di operare cicli di potenza ad alta efficienza.
Come sottolineato precedentemente, risultano caratteristiche distintive delle tecnologie STE e CST sia la possibilità di abbinare in maniera relativamente semplice un sistema di stoccaggio termico, che la possibilità di integrare l'impianto solare con altri impianti esistenti o di nuova costruzione basati su altre tecnologie. Di seguito vengono approfondite queste opzioni.

Stoccaggio di energia termica

Un impianto CSP dotato di sistema di stoccaggio di energia termica è in grado da una parte di bi-

lanciare le variazioni a breve-termine della produzione legate alla variabilità della radiazione solare e dall'altra di prolungare la produzione dopo il tramonto o di spostarla nelle ore in cui il valore dell'energia è più elevato. In base alle richieste e alla modalità di utilizzo dell'energia, la taglia dello stoccaggio, normalmente espressa come numero potenziale di ore di funzionamento al carico nominale dell'impianto, può variare, permettendo di arrivare fino alla copertura della produzione 24 ore al giorno per sette giorni alla settimana nei periodi estivi.
Tra le soluzioni TES già commerciali o comunque più vicine al mercato si possono identificare tre principali categorie:

- Sistemi a doppio serbatoio. Essi rappresentano lo stato dell'arte e l'unica soluzione attualmente implementata negli impianti commerciali. Si basano sull'accumulo di calore sensibile in un fluido (tipicamente sali fusi) contenuto in due serbatoi a diversa temperatura. Durante la fase di carica, il fluido di accumulo viene prelevato dal serbatoio freddo, riscaldato con il calore in eccesso prodotto dal campo solare, ed immagazzinato nel serbatoio caldo. Durante la fase di scarica, il fluido caldo viene utilizzato per fornire calore all'utenza e raccolto nel serbatoio freddo. Il mezzo di accumulo può essere lo stesso HTF (accumulo diretto, attualmente utilizzato nei sistemi a torre con sali fusi) o un fluido diverso (accumulo indiretto, ad esempio PT ad olio con accumulo a sali fusi); in quest'ultimo caso è richiesto un sistema di scambiatori di calore aggiuntivo. Il tipo di mezzo di accumulo utilizzato determina la massima differenza di temperatura possibile tra i due serbatoi. Maggiore è questa differenza, maggiore è la densità energetica e quindi maggiore l'efficienza e minore il costo.
- Sistemi di stoccaggio a termoclino. Si tratta anche in questo caso di sistemi a calore sensibile analoghi ai precedenti, che utilizzano però un solo serbatoio all'interno del quale il materiale di stoccaggio (sali fusi, calcestruzzo, ecc.), coincidente od in contatto con l'HTF, presenta due zone a diversa temperatura e una zona di transizione tra le due temperature detta appunto termoclino. Durante l'esercizio la zona di transizione si sposta facendo aumentare il volume della zona calda in alto a scapito di quella fredda in basso (carica) o viceversa (scarica).
- Sistemi a cambiamento di fase (PCM – phase change materials). Si tratta di sistemi a calore latente che sfruttano la variazione di entalpia associata ad un passaggio di fase, normalmente solido-liquido e viceversa. Attualmente non esistono impianti commerciali che sfruttano questo principio ma molti studi e sperimentazioni in scala pilota sono già stati condotti. L'uso dei PCM apre nuove possibilità di stoccaggio ad esempio per impianti con produzione diretta di vapore che non possono sfruttare in modo efficiente sistemi TES a calore sensibile.

Impianti solari CSP integrati/ibridi/cogenerativi

Un impianto CSP per sua natura può essere integrato in modo semplice con altre fonti di energia di origine fossile e/o rinnovabile. La strategia di integrazione può essere scelta in modo da incrementare la produzione totale durante le ore di insolazione (l'energia da solare si somma a quella convenzionale mantenuta costante) oppure mantenendo la produzione costante e riducendo il consumo di combustibile e le emissioni di CO_2 quando è presente l'apporto solare.
Si riportano alcuni esempi di integrazione/ibridizzazione:

- Impianti ISCC (integrated solar combined cycle). Si tratta di impianti a ciclo combinato convenzionale in cui l'impianto solare contribuisce fornendo una quantità aggiuntiva di vapore alla turbina. Questa integrazione rappresenta un metodo pratico ed efficace di applicazione della tecnologia CSP per la generazione elettrica, favorendo lo sviluppo della tecnologia nel breve e medio periodo. L'integrazione consente infatti di mitigare gli elevati costi di investimento specifici (la sezione di potenza è condivisa con l'impianto tradizionale) e di avere una produzione dispacciabile anche in assenza di un sistema TES. Per contro, per non penalizzare il ciclo combinato, il contributo solare può al massimo raggiungere circa il 15% della potenza installata. La tecnologia ISCC può essere considerata commercialmente provata essendo già operativi nel mondo 7 impianti e altri sono in fase di costruzione o sviluppo.
- Impianto ibrido CSP/biomassa. Durante il giorno l'impianto di potenza è alimentato con il calore proveniente dal sole mentre la notte con quello generato dalla combustione della biomassa. Questa ibridizzazione rende più semplice la gestione della sezione di potenza, che può operare continuativamente, evitando fermate/avviamenti giornalieri, e conseguentemente permette di incrementarne l'efficienza. Nel 2012 è stato avviato in Spagna a Les Borges Blanques, il primo impianto commerciale ibrido CSP/biomassa da 22.5 MW.
- Impianto ibrido PV/CSP. Questa soluzione unisce le due tecnologie solari traendo vantaggio dal basso costo del fotovoltaico per la produzione durante il giorno e dalla dispacciabilità del CSP con stoccaggio durante le ore serali e notturne. Gli impianti ibridi PV/CSP costituiscono un approccio emergente e sono ancora in fase di sviluppo. In Cile è stato recentemente finanziato un progetto da 210 MW mentre in Marocco sono state lanciate due gare per la costruzione di 2 impianti.

Gli impianti CSP semplici o integrati possono essere inoltre progettati per funzionare in modalità cogenerativa. In questo caso alla produzione di energia elettrica è associata anche quella di energia termica. A seconda della taglia dell'impianto e della qualità, il calore coprodotto può essere utilizzato come calore di processo industriale o, ad esempio, per la dissalazione dell'acqua.
Da sottolineare che anche gli impianti CST per applicazioni termiche possono essere realizzati in configurazione ibrida e integrati con centrali termiche convenzionali.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Il principale motivo di sviluppo dei sistemi CSP/CST è legato alla loro possibilità di sostituire la generazione elettrica/termica da fonte fossile riducendo quindi le emissioni di gas serra, responsabili dei cambiamenti climatici. Ogni m^2 di superficie specchiante di un impianto CSP, infatti, permette di evitare, a seconda della configurazione, da 200 a 300 kg di CO_2 emessa ogni anno.
Inoltre, la dispacciabilità dell'energia prodotta rende questa tecnologia un'opzione preferibile rispetto ad altre risorse rinnovabili. Grazie allo stoccaggio termico e alla possibilità di ibridizzazione, gli impianti CSP/CST possono infatti seguire la domanda fornendo energia elettrica/termica su richiesta in maniera affidabile. Nel caso di produzione di energia elettrica, la sua promozione è quindi di interesse comune per i Paesi Membri dell'UE che devono affrontare problemi quali la

stabilizzazione della rete al crescere dei contributi provenienti da fonti non programmabili (fotovoltaico ed eolico) e aumentare l'indipendenza da un punto di vista energetico.
Il Medioriente e il Nord Africa rappresentano destinazioni attrattive emergenti per questo tipo di installazioni, dato il buon irraggiamento solare, le scarse precipitazioni, la disponibilità di terreni pianeggianti e l'incremento della domanda di elettricità che raddoppia ogni 10 anni.
Secondo quanto riportato dalla Agenzia Internazionale dell'Energia (IEA), fino al 2020 la diffusione della tecnologia CSP necessiterà del sostegno di una politica incentivante, mentre tra il 2020 e il 2030, la produzione di energia elettrica da CSP dovrebbe diventare competitiva con quella base-load convenzionale grazie alla riduzione dei costi e all'aumento dei prezzi della CO_2 e dei combustibili fossili. é previsto che la capacità installata mondiale raggiunga i 261 GW al 2030 e i 982 GW al 2050, contribuendo per circa l'11% alla produzione totale di energia elettrica e permettendo una riduzione annuale di CO_2 emessa di circa 2.1 miliardi di tonnellate. USA, Africa, Cina, India e Medioriente diventerebbero i più grandi produttori e esportatori, mentre l'Europa sarebbe il più grande importatore dalle regioni del Nord Africa attraverso linee di trasmissione HVDC. Sul lungo termine, i bassi costi dell'energia prodotta via CSP dovrebbero compensare i costi addizionali della trasmissione.
In Italia, accanto alla possibilità di realizzare grandi impianti CSP, un'opzione molto interessante e in via di sviluppo, è l'applicazione della tecnologia CST per la produzione di calore industriale, realizzabile con impianti di medie-piccole dimensioni. Il consumo energetico dell'industria è costituito per più di 2/3 da calore di processo a temperature inferiori a 350°C, attualmente prodotto per l'80% da fonti fossili (gas naturale e petrolio). Si stima che circa 1/3 di questo calore possa essere prodotto per via solare entro il 2030 con una notevole riduzione di consumo di combustibili fossili e di emissioni di CO_2. In particolare, le principali applicazioni potrebbero essere nei settori alimentare e bevande, tessile, legno e carta, in cui la temperatura richiesta è inferiore ai 250°C. L'industria italiana è attiva in questo settore ed è già in grado di fornire impianti completi ma rimane ancora molto spazio per lo sviluppo.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Come già riportato, nel 2017 la capacità totale installata nel mondo ha raggiunto quasi i 5 GW, con circa il 46% degli impianti operativi localizzati in Spagna ed il 36% in USA. Negli ultimi anni l'interesse si è ampliato verso nuovi mercati come Sud Africa, Marocco, Cile e Cina, grazie alle buone condizioni di irraggiamento solare e alle politiche favorevoli presenti in questi paesi.
La tecnologia più matura e commercialmente disponibile è quella a collettori parabolici lineari (PT). Circa l'80% degli impianti ad oggi operativi sono infatti basati su questa tecnologia e negli anni è stata accumulata una significativa esperienza sia nell'engineering procurement and construction (EPC) che nelle operazioni O&M (operation and maintenance).
I primi impianti PT sono stati realizzati negli anni '80 in California e non prevedevano nessun tipo di stoccaggio (9 impianti per un totale di 354 MW, denominati Solar Electric Generating Systems –SEGS I – IX, 7 dei quali ancora in funzione), mentre il primo impianto utility-scale con accumulo è entrato in produzione in Spagna nel 2008 (Andasol I da 50 MW con 7.5 ore di stoccaggio). Attualmente il più grande impianto PT, 280 MW di potenza nominale, è Solana Generating Station

in Arizona, copre un'area di 780 ha e che, con 6 ore di stoccaggio, produce circa 944 GWh/anno ed ha un capacity factor del 38.5%. Da segnalare l'impianto in fase di sviluppo avanzato da parte della DEWA negli Emirati Arabi che avrà una potenza nominale di 600 MW con 10 ore di stoccaggio, la cui entrata in funzione è prevista per il 2020.

Esempi invece di impianti ibridi ISCC operativi sono Hassi R'mel (20 MW) in Algeria, Al-Kuraymat (22 MW) in Egitto e Ain Beni Mathar (20 MW) in Marocco. Altri 3 impianti ISCC sono in costruzione, 2 in Arabia Saudita e 1 in India. Quest'ultimo invece di utilizzare la tecnologia PT utilizzerà sistemi Fresnel.

Pur rimanendo la tecnologia PT dominante per gli impianti oggi in esercizio e in costruzione, è da sottolineare l'aumento di interesse per i sistemi a torre ST che arrivano ad un 45% tra quelli in costruzione e addirittura a circa il 70% degli impianti in fase di sviluppo.

Anche per questa tecnologia i primi impianti dimostrativi sono stati realizzati negli anni '80 e '90. Attualmente l'impianto ST più grande è Ivanpah Solar Electric Generating System

con una potenza installata di 392 MW, costituito da tre campi solari, ognuno con la propria torre e turbina, senza stoccaggio. L'impianto a torre con stoccaggio più grande è invece Crescent Dunes Solar Energy che è caratterizzato da una potenza nominale di 110 MW e uno stoccaggio termico equivalente a 10 ore di funzionamento a pieno carico. L'impianto genera 500 GWh/anno con un capacity factor risultante del 52%.

Per quanto riguarda la tecnologia Fresnel, ad oggi risultano operativi e in costruzione impianti per circa 200 MW e circa 200 MW in fase di sviluppo. Il più grande tra questi è l'impianto da 125 MW facente parte del progetto Dhursar in India, che è diventato operativo nel 2014.

Come ricordato precedentemente, gli impianti Fresnel, sono particolarmente adatti alla produzione di calore industriale a media-bassa temperatura. In Italia ci sono diverse applicazioni di questo tipo tra cui l'impianto da 470 kWth realizzato da CSP-F e operativo dal 2015 nel caseificio Nuova Sarda Industria Casearia a San Nicolò d'Arcidano (Oristano) che produce calore per la lavorazione dei formaggi.

Estendendo il focus anche agli altri tipi di impianti CSP presenti in Italia, è da segnalare il già citato, impianto a collettori parabolici lineari Archimede da 5 MWe installato a Priolo Gargallo (Sicilia) di proprietà Enel e realizzato su tecnologia Enea che rappresenta l'unico esempio al mondo di utilizzo di sali fusi come fluido termovettore e mezzo di stoccaggio in un impianto PT. A fronte di un aumento di efficienza nella conversione termico-elettrico, l'utilizzo di sali fusi ha richiesto lo sviluppo tecnologico da parte di Enea di una serie di componenti chiave quali i collettori, i tubi ricevitori, il sistema di stoccaggio.

A Rende (Calabria), inoltre, è stato sviluppato da Falck Renewables, ed è operativo dal 2014, un impianto ibrido CSP/biomassa per la generazione elettrica in cui il calore prodotto dal campo solare Fresnel (tecnologia Elianto) si integra con quello prodotto da un impianto già esistente a biomassa. A fine 2017 è entrato in produzione un impianto da 600 kWe a Ottana (Sardegna) realizzato da CSP-F, che utilizza collettori lineari Fresnel, tubi ricevitori forniti da Archimede Solar Energy ed è dotato di una turbina ORC Turboden per la generazione di elettricità.

Molti altri progetti sono in fase di sviluppo, tra cui quello di integrazione della produzione di energia termica e frigorifera della nuova centrale di cogenerazione ACEA di Tor di Valle, di cui

ENEA ha curato lo studio di fattibilità. Eni, inoltre, sta realizzando un impianto PT da 1 MWth nel sito industriale di Assemini per la produzione di calore di processo che andrà ad integrare quello proveniente da fossile con una diminuzione delle emissioni di CO_2.
Dato il carattere innovativo di questo tipo di installazioni per il nostro Paese, una serie di iniziative in corso per la realizzazione di impianti CSP di medie-grandi dimensioni (fino a 50 MWe) stanno procedendo a rilento a causa di difficoltà normative e autorizzative.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

Il costo di un impianto CSP/CST varia significativamente a seconda della tecnologia, della taglia, del sistema di stoccaggio, del costo del terreno e del lavoro locale e dal livello di maturità (pilota, demo, commerciale) del progetto. I costi di investimento e finanziari rappresentano più dell'80% del costo dell'elettricità prodotta via CSP. Secondo la visione della IEA, nel 2050 i costi di investimento scenderanno dagli attuali 4000 – 8000 $/kW a 2800 – 4000 $/kW per impianti con 6 ore di stoccaggio e una produzione annuale fino a 4500 ore di funzionamento a pieno carico, ovvero con un capacity factor di circa il 52%, mentre il costo di produzione dell'energia elettrica (LCOE) raggiungerà in media i 7 c$/kWh. Tale valore sembra essere abbastanza conservativo se paragonato con le stime di ESTELA, che prevedono un LCOE nel range di 8-10 c€/kWh al 2025, e con gli obbietivi della SunShot Initiative del Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti, che addirittura ha fissato un target di 6 c$/kWh al 2020.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 23

COLLETTORI SOLARI LUMINESCENTI E INTEGRAZIONE URBANA DEL FOTOVOLTAICO

I collettori o concentratori solari sono sistemi ottici in grado di assorbire la radiazione solare di una vasta superficie, convogliarla su una superficie più piccola e quindi ottenere una radiazione per unità di superficie molto più intensa la quale viene fatta incidere su di una cella fotovoltaica. L'impego di questi dispositivi accoppiati a delle celle solari genera un drastico aumento della quantità di luce che colpisce la superficie della cella, e quindi un forte aumento della densità di corrente foto-generata dalla cella fotovoltaica. L'impiego di concentratori tradizionali di tipo geometrico basati su specchi o lenti paraboliche comporta purtroppo una serie di svantaggi, associati principalmente al loro ingombro volumetrico, aspetto per cui non hanno un ampio campo di applicabilità in ambienti urbani, ma possono valorizzare vaste aree desertiche e/o non abitate. Inoltre, la capacità di concentrare la luce solare dipende, oltre che dalla geometria del dispositivo, dalla direzione di incidenza della radiazione solare. Questo aspetto è stato assecondato dotando i concentratori di un sistema mobile per il tracciamento della radiazione solare. Un'altra problematica che affligge questi sistemi è il raggiungimento di temperature molto elevate durante le fasi di concentrazione solare, che potrebbe compromettere il rendimento della cella fotovoltaica nel tempo. Un approccio alternativo per la concentrazione della radiazione solare, svincolandosi dall'impiego di dispositivi di grandi dimensioni, è rappresentato dall'utilizzo di collettori solari luminescenti chiamati anche concentratori solari luminescenti o fluorescenti (LSC). I concentratori solari luminescenti sono dei dispositivi ottici piani contenenti disperse molecole di fluoroforo ad alta resa quantica in grado di assorbire la radiazione elettromagnetica solare incidente e di emettere successivamente la radiazione luminescente, che risulta essere per la maggior parte intrappolata e concentrata sui bordi del dispositivo stesso grazie al principio della guida d'onda.

Di conseguenza, la radiazione solare raccolta sulla superficie del dispositivo esposta alla luce, viene convogliata sulla superficie laterale, più piccola rispetto alla precedente, ottenendo una radiazione avente una maggiore intensità, ovvero più concentrata. Le celle fotovoltaiche collocate ai bordi del dispositivo saranno in grado quindi di assorbire la fluorescenza emessa dal collettore a seguito dell'illuminazione solare convertendo l'energia luminosa in elettrica (Figura 1).

Questa tecnologia presenta molteplici vantaggi rispetto alle tipologie di concentrazione geometrica, tra cui una struttura leggera e poco voluminosa, una tecnologia di produzione a basso costo, prestazioni ottiche ottime anche in condizioni di luce diffusa e una drastica diminuzione della quantità di silicio per la produzione della cella fotovoltaica.

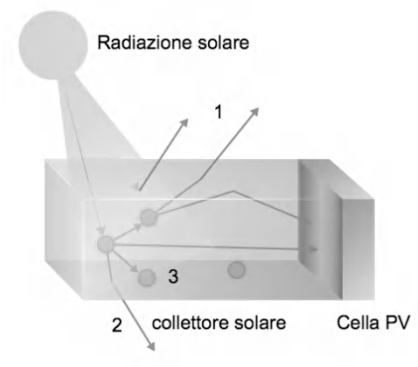


FIGURA 1. PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DI UN LSC IRRADIATO DA UNA SORGENTE LUMINOSA.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Oggi, la riduzione del costo per unità di potenza generata è la forza trainante nelle tecnologie solari fotovoltaiche. Il costo del modulo fotovoltaico è compreso tra 0,8-2 Euro/Wp, portando il prezzo dell'elettricità in alcuni paesi dell'UE vicino a ~0,2 Euro/kWh, ma ancora lontano da quello di ~0,04 Euro/kWh ottenuto dalle centrali elettriche a combustibili fossili.[67] La concentrazione della luce solare è un percorso promettente per le tecnologie fotovoltaiche. Come già riportato, rispetto ai concentratori standard basati sull'ottica geometrica, i concentratori solari luminescenti mostrano diversi vantaggi: peso ridotto, alti fattori di concentrazione teorici, capacità di lavorare bene con luce diffusa e senza necessità di inseguitori o dispositivi di raffreddamento e facile integrazione in architetture moderne. Sebbene la tecnologia dei concentratori solari luminescenti sia nata negli anni '80, i sistemi LSC-cella fotovoltaica hanno ricevuto solo recentemente un grande impulso grazie allo sviluppo di nuovi materiali più efficienti e di architetture urbane che hanno ispirato l'utilizzo dei panelli colorati come LSC e quindi innescato l'integrazione del fotovoltaico negli arredi urbani. Il mercato del fotovoltaico integrato nelle moderne città è destinato infatti ad aumentare costantemente, promosso dalla direttiva europea sull'energia 2010/31/UE, in base alla quale ogni nuovo edificio dovrebbe essere a "quasi zero energia" dal 2020 in poi. Inoltre, l'uso di materiali plastici a basso costo e dei processi di preparazione industriali consolidati offrono mezzi incoraggianti per includere l'energia solare nell'ambiente urbano. Tuttavia, gli LSC sono afflitti da alcuni processi critici che ostacolano la loro capacità di fornire tutta la luce solare assorbita alle celle fotovoltaiche, a causa di processi dissipativi dovuti sia alla natura del materiale plastico che all'efficienza ottica del fluoroforo utilizzato. Recentemente, la ricerca sui sistemi LSC-PV si è concentrata sull'efficienza di conversione di potenza (PCE, ad oggi con un record di 7,1%) migliorando la finestra di assorbimento spettrale delle LSC, ovvero aumentando il numero di fotoni catturati da parte del collettore. Numerose sono state le soluzioni proposte dalla ricerca scientifica allo scopo soprattutto di ampliare la finestra di assorbimento della luce solare impiegando ad esempio miscele di fluorofori organici a base

67 Nicola Armaroli, Vincenzo Balzani, "Energia per l'astronave Terra. L'era delle rinnovabili", Zanichelli 2017

perilenica e di ridurre i fenomeni di auto-assorbimento della fluorescenza. A tale scopo, oltre ai fluorofori organici sono stati anche studiati complessi di metalli, e nanoparticelle fluorescenti (punti quantici) ma sorgono problemi di compatibilità con il supporto polimerico oltre una certa concentrazione. Ultimamente sono stati proposti anche LSC basati su coloranti trasparenti alla luce visibile ma fluorescenti nel vicino infrarosso allo scopo di promuovere l'impiego di LSC come finestre di edifici, ma PCE di appena lo 0,4% circa sono state raggiunte. Di conseguenza molta ricerca ad oggi è condotta a livello mondiale per incrementare le prestazioni dei sistemi LSC-cella fotovoltaica e per massimizzare la diffusione di tale tecnologia nel tessuto urbano all'interno del piano strategico di investimenti dedicato alla "building-integrated photovoltaics" (BIPV).[68]

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Dal Protocollo di Kyoto sottoscritto l'11 dicembre 1997 che impegnava i paesi sottoscrittori ad una riduzione quantitativa delle proprie emissioni di gas ad effetto serra, alla conferenza di Parigi del dicembre 2015 che definì un piano d'azione globale per limitare il riscaldamento globale ben al di sotto dei 2 °C, molti degli attori internazionali nel campo dell'energia hanno incrementato notevolmente la loro politica verso la generazione di energia da fonti rinnovabili.

La stessa ENI in Italia ha dichiarato l'obiettivo di ridurre l'impronta ambientale delle loro attività promuovendo il lavoro di ricerca e sviluppo nell'area "Renewable Energy and Environment", con un focus privilegiato sul fotovoltaico, lo stoccaggio energetico e la valorizzazione energetica delle biomasse. Dal 2007 difatti ENI ha dedicato l'intera struttura di ricerca dell'Istituto Donegani di Novara ad un centro specializzato per la Ricerca sulle Energie "non convenzionali". Tra le diverse tecnologie d'interesse, notevole impulso è stato dato al settore dell'energia solare e del fotovoltaico in particolare con progetti tutt'oggi finanziati per lo sviluppo di celle solari moderne e innovative e di concentratori solari luminescenti. Il primo edificio ad esser dotato di pannelli LSC è stato la sede della Divisione Refining & Marketing di Eni a Roma: l'impianto, realizzato su scala dimostrativa in collaborazione con il politecnico di Milano, è composto da 192 lastre polimeriche concernenti un fluoroforo di colore giallo e trasparenti a molta della luce visibile. La superficie totale di 60 m^2 ed è in grado di produrre una potenza di 500 Wp, impiegata a livello dimostrativo per la ricarica di biciclette elettriche.

Il contributo italiano alla tecnologia LSC è stato affiancato a livello mondiale, soprattutto a partire dagli anni 2007-2008 data in cui il prezzo del carburante è aumentato di circa il 100% (Figura 2a).

Tra gli attori internazionali coinvolti nello sviluppo e ricerca di LSC l'Italia è in terza posizione in fatto di produzione scientifica e brevettuale sopravanzata soltanto dall'Olanda e dagli Stati Uniti (Figura 2b).

Proprio in questi due paesi la tecnologia LSC ha contribuito al finanziamento di diversi progetti nazionali per il rivestimento di facciate esterne e vetri per finestre di edifici, di aree di attesa per i trasporti pubblici, dispositivi di ombreggiamento e illuminazione stradale. In Olanda, uno di questi concetti progettuali proposti denominato "Re(d)Garden" mira a creare una serra urbana su piccola scala in grado di fornire erbe e piante mentre genera energia per il proprio uso (illuminazione

68 F. Meinardi, F. Bruni and S. Brovelli, Nature Reviews Materials, 2017, 2, 17072

e pompaggio dell'acqua per l'irrigazione). Questo progetto si inserisce in uno spazio sociale che possa essere collocato in aree prive di vegetazione, contribuendo al contempo alla produzione di energia rinnovabile, all'agricoltura urbana e alla raccolta di acqua piovana per far fronte agli eventi di pioggia estrema e alle inondazioni.

La tecnologia che prevede l'impiego di finestre colorate come LSC in serre moderne sta avendo molto impulso anche negli Stati Uniti grazie all'idea innovativa di un team di ricerca che ha compreso UC Santa Cruz, NASA, tutti i tipi di coltivatori locali e la Silicon Valley. Lo spettro luminoso ottimizzato della finestra LSC migliora la produzione di energia e facilita la crescita delle piante. Da tale collaborazione è nata la "Soliculture" che è la prima azienda a sviluppare e commercializzare completamente la tecnologia LSC per installazioni su larga scala.

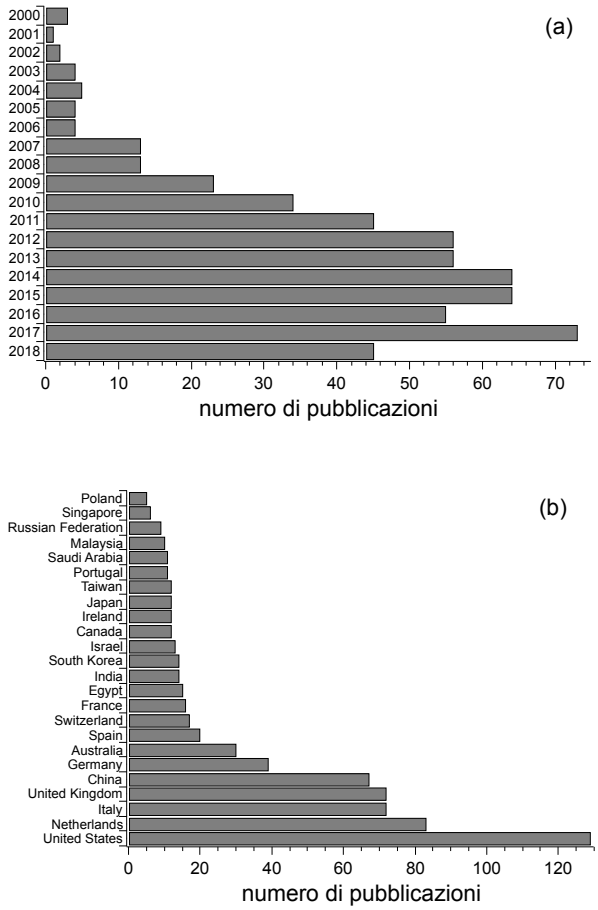


FIGURA 2. NUMERO DI PRODOTTI DELLA RICERCA E SVILUPPO TECNOLOGICO IN FUNZIONE DELL'ANNO DI PUBBLICAZIONE (A) E PAESE (B). FONTE SCOPUS – ELSEVIER.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

La diffusione della tecnologia LSC su larga scala sarà possibile solo se il costo della potenza generata risulta essere inferiore a 1 €/Wp. Assumendo un rapporto realistico tra costo del collettore solare e il costo della cella fotovoltaica di 1/15, è stato dimostrato che il costo relativo più basso per unità di potenza può essere compreso tra 0,35 e 0,55 € per uno spessore e una lunghezza della concentratore variabile da 1 mm e 0,25 m, a 10 mm e 0,55 m, rispettivamente. Di conseguenza, Il costo relativo per unità di potenza di un LSC potrebbe essere di circa 1/3 di quello di una cella fotovoltaica a silicio cristallino. Ulteriori miglioramenti nella tecnologia LSC sono sicuramente necessari e possono essere previsti aumentando ulteriormente il guadagno energetico relativo alla conversione luce-corrente elettrica mantenendo la stessa copertura. L'obiettivo difatti più importante è quello di rimuovere il maggior numero possibile di meccanismi di perdita della radiazione fluorescente allo scopo di massimizzare l'efficienza ottica del concentratore solare luminescente.

Nel caso specifico degli LSC al momento mancano studi dettagliati relativi alle risorse economiche stimate per la loro diffusione mondiale, anche se tale tecnologia s'inserisce di fatto all'interno del piano strategico di investimenti dedicato alla "builiding-integrated photovoltaics" (BIPV). Secondo un rapporto di ricerca di "n-tech research" del Febbraio 2017, il mercato globale della BIPV dovrebbe aumentare da circa 3 miliardi di dollari nel 2015 a oltre 9 miliardi nel 2019 e salire fino a 26 miliardi nel 2022. In particolare il settore della BIPV dedicato alle finestre per edifici raggiungerà un mercato di circa 2,1 miliardi di $ entro il 2018 e 6,3 miliardi di $ entro il 2022.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 24

FLESSIBILITÀ E SICUREZZA DEL SISTEMA ELETTRICO IN SINERGIA CON LA RETE GAS

La flessibilità operativa di un impianto di generazione termoelettrica si può ricondurre a una "famiglia di prestazioni" che raggruppa: la rapidità di risposta alle variazioni di carico nell'intero inviluppo operativo, il minimo tecnico, il minimo tecnico ambientale, l'efficienza ai carichi parziali e i tempi di start-up e shut-down. Se si esclude la generazione idroelettrica, il cui impiego è limitato dalla disponibilità di siti idonei, i turbogas a ciclo aperto (OCGT) e a ciclo combinato (CCGT) rappresentano ad oggi la soluzione migliore per rispondere ai requisiti di flessibilità del sistema elettrico. I turbogas a ciclo aperto, soprattutto se di derivazione aeronautica, sono caratterizzati da elevata flessibilità di esercizio e si prestano benissimo alla generazione di picco, ma sono caratterizzati da un'efficienza termodinamica relativamente bassa (tipicamente < 40%) e, di conseguenza, da alte emissioni e alti costi di esercizio. I turbogas a ciclo combinato rappresentano la migliore tecnologia di generazione termoelettrica in termini di efficienza termodinamica, ma il cycling termico dovuto ai frequenti avviamenti e alle variazioni di carico durante l'esercizio flessibile, impatta negativamente sulla redditività economica dell'impianto a causa dell'aumento dei costi di manutenzione e della riduzione della vita tecnica. Inoltre, gli impianti turbogas operati in esercizio flessibile in generale sono completamente inadatti all'implementazione delle tecnologie di cattura e stoccaggio della CO_2 (CCS), non soltanto per i costi di investimento elevati, ulteriormente esacerbati dalla bassa concentrazione della CO_2 nei fumi, ma principalmente per la completa inadeguatezza delle attuali tecnologie CCS a soddisfare i crescenti requisiti di flessibilità operativa tipici della generazione elettrica di back up delle rinnovabili non programmabili (VRE). Negli ultimi anni è cresciuto a livello internazionale l'interesse verso i cicli di potenza a CO_2 supercritica con ossi-combustione (OXYSCO2), quale tecnologia dal potenziale effetto dirompente nella soluzione simultanea dei problemi sopra elencati, in grado di integrare la flessibilità operativa tipica degli OCGT, con un'efficienza termodinamica simile ai CCGT e la possibilità di catturare la CO_2 senza compromettere la flessibilità operativa dell'impianto di conversione. I cicli OXYSCO2 sono essenzialmente motori a combustione interna che utilizzano la CO_2 come fluido di lavoro, concettualmente simili agli impianti turbogas convenzionali. Il termine "supercritico" si riferisce alle condizioni termodinamiche del fluido di lavoro che evolve a temperature e pressioni superiori alla temperatura critica (~31°C, ~73 bar). Una delle caratteristiche più significative dei cicli di potenza OXYSCO2 è la capacità di implementare in maniera flessibile ed efficiente la separazione e la compressione della CO_2 generata dal processo di ossi-combustione, senza la necessità di componenti di impianto e processi dedicati. I cicli OXYSCO2 operano in un intervallo di pressione compreso tra circa 80 e 300 bar, la CO_2 generata con il processo di combustione può quindi essere separata per semplice spillamento, in condizioni di pressione ottimali per lo stoccaggio. La caratteristica sopra

descritta consente un'interessante sinergia tra i cicli di potenza OXYSCO2 e il Power-to-Gas (P2G). Il P2G consiste essenzialmente nel trasformare l'eccesso di produzione elettrica da VRE in idrogeno via elettrolisi. L'idrogeno prodotto e la CO_2 estratta dai cicli di potenza OXYSCO2 possono essere trasformati in un combustibile analogo al gas naturale (SNG) mediante il processo di metanazione. Attualmente la rete elettrica è interfacciata con la rete gas in maniera unidirezionale o, in altri termini, le due reti possono scambiare volumi significativi di energia solo dalla rete gas verso la rete elettrica. L'interfaccia tra le due reti è costituita dagli impianti turbogas. L'introduzione del P2G consentirebbe di scambiare energia tra le due reti anche nel verso opposto, utilizzando il P2G come interfaccia speculare ai turbogas e l'SNG come ulteriore vettore energetico sostanzialmente analogo al gas naturale. In tal senso il P2G renderebbe il sistema elettrico più flessibile, resiliente e sicuro, assumendo le funzioni di stoccaggio stagionale dell'eccesso di generazione da VRE e di stabilizzazione della rete elettrica, quest'ultima ottenibile modulando localmente e/o da remoto (e.g. dal gestore di rete) la potenza assorbita dagli elettrolizzatori. A sostegno della sinergia OXYSCO2 - P2G va altresì notato che la necessità di disconnettere o modulare la produzione da VRE non nasce esclusivamente dall'eccesso di produzione e dal conseguente disaccoppiamento tra la domanda e l'offerta di energia elettrica, ma anche dai limiti di stabilità della rete che impongono la connessione obbligata (must-run) di una quota non trascurabile di generatori sincroni in grado di garantire il bilanciamento in tensione e frequenza della rete elettrica e di fornire la capacità di riserva necessaria a soddisfare i requisiti di stabilità dinamica (transitori). Ciò comporta la necessità di mantenere attiva una quota significativa di "riserva rotante calda", che, considerato l'annunciato phase-out del carbone, sarà in gran parte garantita dalla generazione termoelettrica alimentata a gas naturale.

In questo contesto si colloca la sinergia tra i cicli OXYSCO2 e il P2G: i primi opererebbero quale risorsa di back up in condizioni di deficit di produzione da VRE, stoccando temporaneamente la CO_2 prodotta dalla combustione per il successivo utilizzo nella filiera del P2G; in condizioni di surplus da VRE, l'eccesso di produzione potrebbe essere convertito in SNG utilizzando la CO_2 precedentemente stoccata. Il processo opererebbe in maniera alternativa, con fasi di back up energetico e stoccaggio della CO_2 seguite da fasi di prelievo della CO_2 con produzione di SNG e iniezione dello stesso nella rete gas. Lo stoccaggio temporaneo della CO_2 potrebbe essere effettuato in giacimenti depleti di gas naturale che avrebbero l'ulteriore pregio di essere efficacemente connessi con la rete gas. A livello di sistema elettrico si avrebbero molteplici vantaggi:

a) **decarbonizzazione**: le emissioni di CO_2 imputabili alla generazione di back up a gas naturale sarebbero sensibilmente ridotte grazie all'integrazione di SNG proveniente dall'eccesso di produzione da VRE; gli effetti sarebbero paragonabili a quelli dell'implementazione delle tecnologie CCS, evitando gran parte degli investimenti necessari per implementarle, senza compromettere la flessibilità di esercizio dell'unità di generazione termoelettrica;

b) **accumulo stagionale del surplus di energia da VRE via P2G**: la conversione di elettricità in idrogeno mediante elettrolisi dell'acqua e la successiva conversione dello stesso in SNG mediante metanazione, consente di utilizzare l'infrastruttura della rete gas esistente per la distribuzione e lo stoccaggio del gas naturale. Se si considera l'estensione della rete gas e la capacità di accumulo sotterraneo, a livello europeo il potenziale ascrivibile al P2G potreb-

be essere dell'ordine delle centinaia di TWh, oltre 10 volte l'attuale capacità di pompaggio idroelettrico disponibile. Questa strategia di accumulo ha quindi le potenzialità per assorbire completamente l'eccesso di produzione da vRES, contribuendo attivamente alla decarbonizzazione del sistema elettrico;

c) **densità di potenza**: le pressioni operative dei cicli OXYSCO2, unitamente alle caratteristiche del fluido di lavoro (S-CO_2), consentono di realizzare impianti di conversione con elevatissima densità di potenza e, conseguentemente, con elevata rapidità di risposta alle fluttuazioni di carico e ingombri drasticamente ridotti rispetto alla tecnologia di generazione termoelettrica convenzionale; questa peculiarità, se accoppiata con i processi di elettrolisi e metanazione realizzati alle pressioni tipiche della rete di trasmissione del gas naturale (~ 80 bar), consentirebbe realizzazioni estremamente compatte dell'intero sistema OXYSCO2 – P2G, compatibili con l'installazione in siti fortemente vincolati in termini di superficie disponibile. Quest'ultima caratteristica aprirebbe interessanti prospettive anche in termini di riutilizzo delle piattaforme petrolifere in dismissione, spesso dislocate nelle vicinanze di aree con forte concentrazione di VRE.

L'utilizzo di giacimenti depleti per lo stoccaggio sotterraneo del gas naturale è una pratica adottata da diversi decenni. Tuttavia, nel caso dello stoccaggio temporaneo della CO_2, si avrebbero differenze notevoli nel mezzo e nella modalità di esercizio. La CO_2 sarebbe iniettata in giacimento allo stato supercritico, una fase molto più densa rispetto al metano, e sarebbe stoccata ed estratta ciclicamente, con cicli di carico e scarico dettati dalle fluttuazioni delle VRE. Di conseguenza, lo stress ciclico cui il sito sarebbe sottoposto e la conseguente reazione tensodeformativa, potrebbero essere di natura molto differente rispetto a quanto già noto per lo stoccaggio del gas naturale. Al netto dello sviluppo della tecnologia correlata con i cicli di potenza $OXYCO_2$ e la filiera del P2G ad alta pressione, ciò comporta la necessità di acquisire know-how sul comportamento geomeccanico dei giacimenti depleti di gas naturale, quando utilizzati per le finalità sopra esposte.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

La crescente penetrazione delle VRE, indispensabile per il raggiungimento degli ambiziosi obiettivi fissati dall'accordo di Parigi (COP21-2015), pone già oggi significative sfide per la sostenibilità della rete elettrica, dovute essenzialmente all'intrinseca non programmabilità del solare fotovoltaico e dell'eolico che, presi insieme, secondo stime dell'International Energy Agency (IEA) rappresenteranno oltre l'80% della nuova capacità da fonte rinnovabile (RES) installata globalmente al 2022. Nel rapporto "Renewables 2017 - Analysis and Forecasts to 2022"

la IEA prevede che la generazione globale da RES supererà globalmente 8.000 TWh entro il 2022, ammontare equivalente al consumo combinato di Cina, India e Germania, o, in altri termini, pari al 30% dell'energia elettrica generata globalmente. La produzione da RES a livello globale supererà nettamente quella da gas naturale, che si attesterà sostanzialmente sui valori attuali, pari a 6000 TWh, riducendo a meno di 2000 TWh il gap rispetto alla generazione da carbone. Tra le RES, fino al 2022, il solare fotovoltaico rappresenterà il maggior contributo in termini di nuova capacità instal-

lata. In Italia, negli anni compresi tra il 2005 e il 2016, la produzione di energia elettrica da RES è sostanzialmente raddoppiata, passando da 55,8 TWh nel 2005 a 110,5 TWh nel 2016, quest'ultima pari al 34% dei consumi finali lordi di energia elettrica. Nello stesso periodo la diversificazione delle RES ha subito un notevole incremento, affiancando alla storica produzione idroelettrica e geotermica i crescenti contributi di eolico e fotovoltaico. Significativamente, la produzione di energia idroelettrica rispetto al paniere complessivo delle RES è passata dal 78% nel 2005 al 42% nel 2016 mentre, nello stesso periodo, la generazione da solare fotovoltaico è cresciuta dallo 0,1% al 20% e la generazione da fonte eolica dal 5% al 15%. Il recente testo della SEN 2017 - Strategia energetica nazionale (di seguito SEN) prevede l'incremento al 55% dei consumi elettrici lordi coperti da RES al 2030, corrispondenti ad una produzione annua pari a 184 TWh, dei quali 40 TWh prodotti da eolico e 72 TWh da fotovoltaico, a fronte di una produzione elettrica complessiva pari a 304 TWh. Le stime della SEN al 2030 indicano che la produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile non programmabile ammonterà quindi a 112 TWh, corrispondenti a circa il 61% dell'intera produzione da RES e a circa il 37% dell'intera produzione elettrica nazionale. La proiezione dello scenario SEN al 2050 prevede che la produzione da RES raggiungerà 370 TWh, pari al 93% della produzione elettrica nazionale, con una larga predominanza delle VRE. L'incremento della produzione da VRE condurrà ad una serie di effetti sul sistema elettrico, tra cui i più importanti sono:

- aumento della variabilità oraria del carico residuo;
- fluttuazioni a breve termine più pronunciate sulla previsione della generazione elettrica, accompagnate da una riduzione dell'inerzia complessiva del sistema;
- congestioni, a livello locale, sulle reti di trasmissione e distribuzione in previsione di un deficit di adeguatezza della rete elettrica nel trasferire e allocare i picchi di produzione da VRE.

In altri termini, l'incremento della generazione elettrica da VRE richiede un aumento della flessibilità del sistema elettrico e mette sotto stress l'adeguatezza e la sicurezza dello stesso. In scenari di produzione da VRE dell'ordine del 50% (e oltre), la richiesta di flessibilità del sistema elettrico, storicamente alimentata principalmente dal lato domanda, sarà sempre di più alimentata dalle fluttuazioni correlate al lato generazione a causa della progressiva incidenza delle VRE sul mix di generazione elettrica. Inoltre, l'incremento di significativi eccessi di produzione da VRE causerà eventi sempre più frequenti di disaccoppiamento tra domanda e offerta, con elevata produzione in carenza di domanda e viceversa. Tutto ciò, in assenza di decise modifiche del sistema elettrico, sia a livello tecnico sia a livello normativo, non può che condurre all'intensificazione di eventi di modulazione forzata o disconnessione di VRE dalla rete elettrica, con conseguente perdita parziale o totale della produzione. Secondo stime ENEA nel 2017 la massima penetrazione da VRE nel sistema elettrico italiano è stata del 73,5%. Un'utile indicatore per valutare il livello di stress del sistema dovuto alle fluttuazioni di potenza da VRE e della conseguente richiesta di flessibilità, è rappresentato dal numero di ore durante le quali il carico residuo orario è variato più del 10% della domanda totale. Questo valore, nell'ultimo lustro, ha raggiunto con frequenza crescente il 20% e in alcuni casi ha raggiunto e superato il 25%. In altri termini, per oltre un quinto delle ore annuali, la generazione elettrica convenzionale ha dovuto far fronte a variazioni orarie di carico superiori al 10% della domanda complessiva. Con riferimento alla sola zona Sud dell'Italia, dove

si concentra la più alta penetrazione da VRE, all'incremento della variazione oraria del carico residuo a cui si è assistito nell'ultimo lustro, si affianca un progressivo aumento dello spread tra i picchi "a salire" e "a scendere", con variazioni orarie massime del carico residuo che nel 2017 hanno raggiunto valori prossimi a +/- 70%. Sempre con riferimento alla zona Sud, un altro indice altrettanto significativo è il numero di ore durante le quali il carico residuo è stato negativo: tale indice è stato pari al 28,3% nel 2016 e al 24% nel 2017[13]. Risulta quindi evidente la necessità di investire sull'incremento della flessibilità del sistema elettrico puntando a superare le barriere tecniche, economiche e normative che costituiscono un ostacolo all'auspicabile diffusione delle VRE e, più in generale, al raggiungimento di soluzioni sistemiche simultaneamente valide nelle tre dimensioni del trilemma energetico. Ad oggi la tecnologia di generazione che meglio interpreta le esigenze di flessibilità del sistema elettrico, cogliendo anche i requisiti di sostenibilità e accessibilità, è l'idroelettrico. Tuttavia la generazione idroelettrica è fortemente vincolata dalla disponibilità di siti idonei. In Italia tali siti, oltre ad essere notevolmente sfruttati, hanno una distribuzione territoriale non completamente compatibile con la distribuzione delle VRE che ne limita l'efficacia come risorsa di back up. Nel 2016 il 76% dell'energia idroelettrica prodotta in Italia si è concentrata in 6 regioni del Nord Italia, mentre nel Centro-Sud Italia è stata prodotta il 97,3% dell'energia eolica e il 47,9% dell'energia fotovoltaica. Gran parte delle risorse di flessibilità del sistema elettrico italiano necessarie a supportare la produzione da VRE provengono dell'impiego degli impianti turbogas, sia in ciclo combinato (CCGT) che in ciclo semplice (OCGT). La capacità di generazione a gas è ampiamente distribuita sul territorio nazionale ma, paradossalmente, sta subendo la pressione di mercato proprio dalle VRE che, con costi marginali prossimi allo zero, ne hanno fortemente modificato il profilo operativo riducendone la competitività economica. A ciò si aggiunge il crescente impatto ambientale della generazione elettrica a gas che sempre più frequentemente è costretta ad operare a carico parziale e con avviamenti giornalieri e conseguente detrimento delle prestazioni termodinamiche e ambientali. È pertanto necessario ottimizzare il sistema elettrico, affiancando alla generazione termoelettrica a gas naturale ulteriori tecnologie in grado di operare sinergicamente nella fornitura di flessibilità mediante traslazione spaziale e temporale dell'allocazione dell'eccesso di generazione da VRE. Data la natura intermittente della generazione elettrica da VRE e il peso crescente che questa assumerà negli anni a venire, risulta evidente la necessità di accumulare l'eccesso di energia rinnovabile per utilizzarla successivamente dove e quando è necessaria. Ad oggi la tecnologia di accumulo più matura è costituita dagli impianti di pompaggio, ampiamente utilizzata da molti anni e rilanciata dalla SEN quale tecnologia abilitante per il raggiungimento degli obiettivi di penetrazione delle RES. La capacità di pompaggio installata in Italia è pari a 7,5 GW, 6 dei quali sono installati nell'arco alpino, 1 GW è installato in provincia di Caserta e 0,5 GW in provincia di Siracusa. Tuttavia, come nel già citato caso dell'idroelettrico, anche qui si pone il problema di una scarsa compatibilità con la distribuzione delle VRE, per la maggior parte in produzione nel Centro-Sud Italia. Tale problema trova riscontro anche nella SEN che a tal fine prevede fino a 5 GW di capacità di accumulo aggiuntiva proprio nel Centro-Sud Italia[15]. L'accumulo di energia elettrica può, in prospettiva, avvalersi di diverse tecnologie specializzate per specifici intervalli temporali che spaziano dai servizi di rete real-time allo stoccaggio stagionale e strategico. Il P2G offre simultaneamente l'opportunità di incrementare l'interconnessione tra le reti

gas ed elettrica, introducendo l'utilizzo di nuovi vettori per il trasferimento dell'energia. A tal fine risulta particolarmente interessante la sinergia tra la generazione flessibile a gas e la tecnologia di accumulo P2G che, accoppiate, consentirebbero virtualmente di assorbire la totalità dell'eccesso di produzione da VRE e rilasciarlo, al netto dei rendimenti, dove e quando serve. È noto che la generazione flessibile a gas rappresenta ad oggi (e nel prossimo futuro) il miglior candidato a fornire capacità di back up della rete elettrica. Il combustibile d'elezione è il gas naturale che, grazie all'impiego del P2G, potrebbe essere integrato con SNG proveniente dall'eccesso di produzione da VRE, contribuendo in maniera decisiva a traslare nel tempo e nello spazio i picchi di produzione da VRE e a decarbonizzare la generazione di back up.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Quale tecnologia emergente, le potenzialità dei cicli OXYSCO2 non sono state ancora dimostrate, tuttavia sono in via di completamento e collaudo due importanti impianti dimostrativi negli USA, mentre numerose altre iniziative per applicazioni che non prevedono l'ossi-combustione e/o per lo sviluppo di specifici componenti sono state avviate in Korea del Sud, Giappone, Regno Unito e Francia. Il prototipo USA realizzato da Net Power è in fase di collaudo, pertanto la tecnologia dei cicli OXYSCO2 allo stato attuale può essere valutata a TRL 6. In Italia sono presenti importanti capacità industriali, soprattutto nell'ambito della realizzazione delle turbomacchine a S-CO_2. Nello specifico BHGE (Nuovo Pignone) ha progettato il gruppo turbo-compressore per molti dei prototipi realizzati negli USA. L'ENEA nel corso degli anni ha progressivamente intensificato il suo impegno nello sviluppo della tecnologia dei cicli a S-CO_2, focalizzandosi sullo sviluppo di specifiche configurazioni di ciclo, sul design delle turbomacchine (in collaborazione con l'università di Roma Tre) e sul supercalcolo per la modellazione del processo di ossi-combustione in condizioni supercritiche. Con riferimento alla tecnologia del P2G, la filiera costituita dai processi di elettrolisi e metanazione applicata in condizioni di forte variabilità del carico a pressioni tipiche della rete di trasmissione del gas naturale, richiede lo studio di soluzioni specifiche non ancora completamente consolidate e dimostrate che, pertanto, posizionano la tecnologia a TRL 5. Con riferimento allo stoccaggio temporaneo della CO_2 in giacimenti di gas naturale depleti, il comparto industriale italiano ha le potenzialità per lo sviluppo di soluzioni specifiche e può far affidamento sui numerosi studi sul sequestro geologico della CO_2 portati a termine nello scorso decennio. Tuttavia la frequenza di iniezione/estrazione richiesta dallo storage temporaneo richiede studi e attività sperimentali specifiche che collocano la tecnologia a TRL 3-4.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

Come illustrato in precedenza, lo sviluppo della tecnologia è basato su tre linee, cicli OXYSCO2, P2G e stoccaggio temporaneo della CO_2, pertanto l'avanzamento in termini di TRL è legato allo sviluppo di ogni singola linea. Le risorse necessarie per il raggiungimento di un TRL medio compreso tra 6 e 7 sono di circa 50 milioni di euro per i prossimi cinque anni.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 25

SOLUZIONI AVANZATE PER LO SFRUTTAMENTO SOSTENIBILE E AD ALTA EFFICIENZA DELLA RISORSA GEOTERMICA NON CONVENZIONALE

I sistemi geotermici fino ad oggi sfruttati per produrre energia elettrica sono stati soltanto quelli idrotermali di media e alta temperatura (>70°C, <200°C) in campi a vapore o acqua dominante accoppiati con l'uso di centrali geotermiche a tecnologia matura (cicli acqua/vapore a condensazione o a contropressione, cicli ORC (Organic Rankine Cycle)). Esistono però in natura anche sistemi geotermici diversi indicati con il termine sistemi geotermici non convenzionali e tra questi rivestono particolare interesse per l'Italia i sistemi magmatici, a fluidi supercritici e a salamoia calda in grado di fornire calore ad alta temperatura e pressione con produzione di vapore anche in condizioni supercritiche (T>374,15°C, P>218 atm). Questi sistemi pur avendo cominciato ad essere sperimentati a livello internazionale solo di recente, potrebbero diventare maturi per uno sfruttamento prima della fine di questo decennio. Nel caso dei sistemi magmatici le ingenti quantità di calore disponibili a profondità relativamente piccola (3000-5000 m) associate a corpi ignei allo stato più o meno fuso i via di raffreddamento, potrebbero essere estratte per mezzo di pozzi perforati fin quasi alla sommità dei corpi stessi. Le modalità di funzionamento previste sono principalmente due: iniezione di acqua a pressione in portata variabile nel tempo in modo da fratturare le rocce (chilling) e successiva estrazione del vapore prodotto mediante un tubing centrale inserito nel pozzo stesso; fratturazione idraulica (hydrofrac) degli strati di cap-rock intorno al corpo igneo, con circolazione di acqua a loop chiuso tra due pozzi, come nel caso degli EGS (Enanched Geothermal System). In generale svolgono un ruolo chiave nel processo di sfruttamento della risorsa i processi di scambio di calore e conversione in energia elettrica che richiedono la messa a punto di tecnologie avanzate idonee a gestire in sicurezza i fluidi particolari derivanti dai sistemi non convenzionali sia per le alte temperature e pressioni in gioco sia per il chimismo aggressivo. Sarà pertanto necessario lo sviluppo e/o utilizzo di materiali e soluzioni processistico/impiantistiche speciali nei diversi sotto-sistemi (vapordotti, scambiatori di calore, turbomacchine) e componenti (valvole) e di chemicals per il controllo dei fenomeni di corrosione/incrostazione derivanti da fluidi ricchi di composti salini e di gas disciolti.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

L'energia geotermica utilizza il calore dalla terra per fornire energia, calore e freddo. È una risorsa pulita, rinnovabile, largamente utilizzata in Europa e nel mondo, e potenzialmente ben integrabile nel paesaggio. L'energia fornita è stabile e flessibile, e ciò rende la geotermia una fonte ideale per bilanciare le reti elettriche e termiche, migliorando così la sicurezza energetica. Le installazioni hanno un chiaro impatto sulle economie locali e sui sistemi energetici; i posti di lavoro a tutti i livelli vengono creati e sostenuti e, sviluppando la flessibilità locale, creano un legame indispensa-

bile tra sistemi centralizzati e decentralizzati. Il Levelized Cost of Energy (65-100 Euro/MWh) e il Capacity Factor (58-85%) degli impianti di generazione geotermoelettrica sono favorevoli rispetto alle altre fonti rinnovabili e la risorsa base utilizzata è ancora marginale rispetto a quella accessibile. Ciò nonostante, l'uso dell'energia geotermica, in particolare per il riscaldamento, sta crescendo piuttosto lentamente in tutta Europa come dimostrano le analisi degli sviluppi del mercato per i settori dell'energia elettrica e del calore di fine 2016. Considerati i 26 progetti in corso di sviluppo (con altri 160 in corso di ricerca), si ritiene che la capacità installata sul continente aumenterà fino a circa 3 GWe nel 2020, grazie anche all'importante aumento legato alla rapida crescita del mercato turco che, durante il periodo 2011-2016, ha rappresentato il 90% della nuova capacità installata e che continuerà a crescere negli anni a venire.
Per quanto riguarda l'Italia le proiezioni di aumento di generazione geotermoelettrica al 2050 sono basate fino al 2030 soltanto sullo sfruttamento dei sistemi idrotermali di alta e moderata temperatura (T>90°C), mentre nel ventennio successivo, dato l'apporto modestamente crescente della risorsa convenzionale, è indispensabile l'apporto dei sistemi non convenzionali che potrebbe raggiungere al 2050 circa la metà dei valori di potenza installata ed energia prodotta. Nonostante tali sistemi abbiano un ragguardevole potenziale energetico complessivo (stimato in 4000 MWe con circa 25 TWh/anno per 50 anni) non sono ancora tecnologicamente maturi per lo sviluppo a scala commerciale a causa di difficoltà tecniche ancora irrisolte. Tali difficoltà sono riconducibili a due gruppi principali di problemi: a) tecnologia di estrazione del calore dal sottosuolo e b) mantenimento di condizioni di equilibrio termo-idraulico nel serbatoio per tempi sufficientemente lunghi da permettere il ritorno dell'investimento iniziale. È quindi necessario l'avvio di azioni di R&S che affrontino in maniera integrata le tematiche della individuazione dei siti, perforazione dei pozzi, attivazione della risorsa e mantenimento, ottimizzazione della tecnologia di conversione, il tutto nel rispetto dei vincoli di sostenibilità economica, ambientale e sociale.

STATO DELL'ARTE ITALIA E ESTERO

La capacità installata di generazione geotermoelettrica a livello mondiale si attesta attorno ai 12,2 GWe per un numero totale di 758 impianti installati. Delle tre principali tecnologie di generazione geotermoelettrica (cicli a vapore surriscaldato, cicli a vapore saturo con flash, cicli binari a fluido organico) i cicli a vapore saturo risultano la tecnologia di gran lunga dominante con 359 installazioni per 7,7 GWe installati. In Europa la situazione è sostanzialmente bilanciata con un'uguale ripartizione tra le tre tecnologie con una potenza installata complessiva di circa 2,4 GWe (102 impianti) e una generazione di circa 15 TWh/anno pari allo 0,5% dei consumi elettrici complessivi. Nella prospettiva che nuove tecnologie di generazione alimentate da sorgenti termiche non convenzionali possano diventare competitive, si stima una produzione geotermoelettrica potenziale in Europa di oltre 2000 TWh/anno in grado di coprire il 50% dei consumi al 2050. In Italia la capacità geotermoelettrica installata è pari a 915,5 MWe con una produzione annuale lorda di 5,82 TWh pari ad una copertura dello 0,87% in termini di energia primaria e del 2% dei consumi elettrici. La produzione è localizzata nei complessi idrotermali di Larderello-Radicondoli-Travale (vapore surriscaldato) e Bagnore-Piancastagnaio (vapore umido) caratterizzati da temperature e pressioni a bocca pozzo negli intervalli 150-270°C e 2-42 bar. Il vapore è accompagnato da una percentuale

di gas incondensabili tra il 1-20% in peso il cui contenuto in idrogeno solforato e mercurio ha comportato l'installazione di sistemi per il controllo delle emissioni in atmosfera (tecnologia AMIS). Attualmente la produzione si limita allo sfruttamento di sistemi idrotermali di più antica coltivazione per i quali si prevede un modesto sviluppo nei prossimi anni. In prospettiva, nel caso di successo delle attività di R&S, ad essi si affiancherà la produzione derivante dallo sfruttamento dei sistemi geotermici non convenzionali che potrebbe aumentare di 2,2-2,7 volte l'attuale generazione con una copertura al 2030 del 5-6% del fabbisogno elettrico.

RISORSE ECONOMICHE

La messa in atto dello sfruttamento dei sistemi geotermici non convenzionali nei tempi coerenti agli obiettivi di de-carbonizzazione dell'economia EU al 2050 in corso di negoziazione, comporta lo svolgimento di un progetto di R&S da avviare e completare prima della fine degli anni 20'. Il progetto avrà lo scopo di verificare la fattibilità tecnico-economica del processo di generazione in relazione alle condizioni geologiche peculiari del Paese; quantificare l'energia totale estraibile dai sistemi non convenzionali nelle aree interessate in combinazione e/o separatamente; individuare le zone più promettenti per la rapida realizzazione di progetti in scala commerciale

Il costo complessivo dell'investimento stimato ai valori attuali dei costi di perforazione degli impianti pilota e del lavoro è dell'ordine dei 200 - 400 Meuro in relazione al numero (10-20) e alla profondità (4-5 km) dei pozzi da perforare e dal numero e taglia delle unità pilota di generazione (N=3-5, W=1-3 MWe). La frazione dell'investimento complessivo prevista nel quinquennio 2019-2024 è dell'ordine del 35-70% (70-280 M€).

SETTORE 3

>CHIMICA<

MEMBRI DEL GRUPPO DI LAVORO

Settore – Chimica

Coordinatori	
ENDURA	**Cosimo Franco**
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA	**Ferruccio Trifirò**
Componenti	
BIRD & BIRD	**Antonella De Gregori**
CNR	**Mauro Marchetti**
COLOROBBIA CONSULTING	**Giovanni Baldi**
STUDIO TRIBUTARIO E SOCIETARIO DELOITTE	
SOCIETÀ TRA PROFESSIONISTI	**Silvia Cesarini**
INSTM	**Gaetano Guerra**
LABORATORI ARCHA	**Fabrizia Turchi**
MAPEI	**Amilcare Collina**
PIRELLI	**Luca Giannini**
SAES GETTERS	**Corrado Carretti**
UNIONCAMERE	**Giuseppe Salonia**
	Lorenzo Lener
UNIVERSITÀ DI ROMA TOR VERGATA	**Francesca Nanni**
UNIVERSITÀ DI PISA	**Anna Maria Raspolli Galletti**
WARRANT HUB	**Massimo Rinaldi**

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 1

CONVERSIONE CHIMICA DIRETTA DI BIOMASSE LIGNOCELLULOSICHE GREZZE O DI SCARTO IN INTERMEDI E BIOFUELS

La valorizzazione di biomasse lignocellulosiche per l'ottenimento di building blocks, intermedi e biofuels rappresenta una delle maggiori sfide per l'Europa e per l'Italia in particolare, vista la nostra penuria di combustibili fossili. In questo ambito alcuni prodotti (basta pensare al bioetanolo, rappresentano una realtà consolidata, sebbene non priva di problematiche tecniche ed economiche ancora da ottimizzare. Si tratta comunque di processi multi-step che abbinano pretrattamenti meccanici, chimici e/o fisici ed infine biocatalitici. Una sfida per il futuro è senza dubbio rappresentata dalla messa a punto di processi sostenibili di conversione chimica diretta di biomasse lignocellulosiche dopo il solo trattamento meccanico di macinazione. Particolaremente interessanti in questo ambito risultano l'idrolisi e l'alcolisi acido-catalizzate della frazione cellulosica della biomassa a dare rispettivamente acido levulinico e gli esteri dell'acido levulinico (Figura 1).

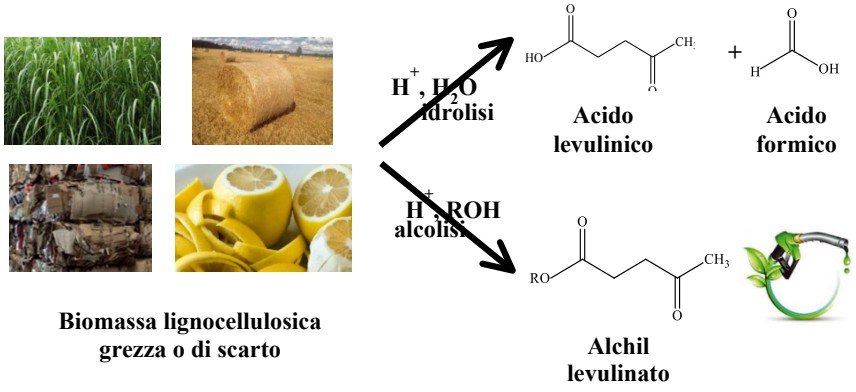


FIGURA 1: IDROLISI ED ALCOLISI DELLA BIOMASSA LIGNOCELLULOSICA

Nel 2004 il DOE (U.S Department of Energy) ha inserito l'acido levulinico tra i 12 biobased building blocks. Nel 2010 la lista è stata rivista ma l'acido levulinico è stato di nuovo inserito ed a tutt'oggi viene costantemente citato come una delle molecole biobased di riferimento, nonostante la sua produzione industriale non sia ancora decollata. La presenza nella molecola dell'acido levulinico di due gruppi funzionali reattivi lo rendono un building block di vastissimo interesse e potenzialità (Figura 2).

D'altro canto gli esteri dell'acido levulinico hanno vaste potenzialità non solo come solventi ed intermedi, ma anche come biofuels, essendo impiegati come additivi ossigenati per il biodiesel (del

quale migliorano le proprietà a freddo) e per benzina e diesel, inoltre le loro proprietà sono modulabili variando l'alcol impiegato per l'alcolisi. Le rese ponderali in levulinato rispetto alla biomassa di partenza variano a seconda del peso olecolare dell'alcol impiegato, ma si riesce a raggiungere una resa molare rispetto agli esosi presenti nella biomassa di partenza fino al 50 % in moli.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

La produzione media annua di biomassa secca, di origine terrestre (agricoltura e foreste), all'interno dell'Unione Europea è di circa 1466 Mt, di queste più del 60% viene utilizzato per l' alimentazione, circa il 19,1% per bioenergie e il 18,8% per i biomateriali. Tralasciando il settore alimentare, le biomasse offrono una vasta gamma di utilizzi, presentando generalmente un basso costo ed in alcuni casi valore negativo (valorizzazione degli scarti di produzione o di rifiuti). Tra queste ultime, per citarne alcune, sono state impiegate con successo per la sintesi dell'acido levulinico le bucce di pomodoro, le bucce di limone esausto, le costole di tabacco, gli scarti cellulosici di cartiera, la lolla di riso, gli scarti dei cereali, la frazione organica della raccolta differenziata. Ottime rese in acido levulinico sono state riportate in studi accademici a partire da colture erbacee dedicate, come l'Arundo donax, il miscanto e il sorgo (rese fino a circa il 30 % in peso di acido levulinico rispetto alla biomassa di partenza secca). Si tratta di biomasse ad alta produttività annuale (fino a 30 tonnellate/ettaro), richiedono basso input, crescono in suoli marginali, hanno un basso prezzo (15 euro/ton per l'Arundo Donax L.). Non a caso Biochemtex ha scelto l'Arundo Donax L. come coltura dedicata per la produzione di bioetanolo nell'impianto di Crescentino Vercellese, il più grande impianto europeo per la produzione di bioetanolo.

La valorizzazione della biomassa lignocellulosica a dare acido levulinico risulta di particolare interesse, in quanto questo platform chemical può contribuire significativamente alla transizione verso un'industria chimica ed energetica "post-petrolio". La presenza nella sua molecola di una funzionalità chetonica e di un gruppo acido carbossilico apre la strada alla sintesi diretta o multistep di una vasta gamma di prodotti strategici, colmando la lacuna ad oggi esistente di materie prime > C4 ottenibili da fonti rinnovabili.

La produzione di acido levulinico porta inoltre alla coproduzione di acido formico (Figura 1), che può contribuire all'economicità del processo con un suo mercato ed anche essere impiegato come catalizzatore acido per il processo stesso, e di un residuo solido ligninico che può a sua volta essere impiegato come combustibile o per la produzione di compositi, carboni attivi o polimeri a base ligninica. D'altro canto, l'alcolisi diretta della biomassa lignocellulosica grezza o di scarto a dare levulinati sta attraendo interesse accademico ed industriale soprattutto in questi ultimi anni, rappresentando un'alternativa attraente al processo in due stadi che prevede la sintesi sopra esposta dell'acido levulinico per idrolisi e la sua successiva esterificazione. Le potenzialità dei levulinati sono notevolissime e variegate, in quanto l'alcol impiegato per l'alcolisi, e quindi il residuo alcolico dell'estere, può essere variato in un ampio range, spaziando dal metanolo ad alcoli a catena lunga. I levulinati possono essere usati come solventi, intermedi per biolubrificanti, plastificanti, tensioattivi, prodotti farmaceutici, e, soprattutto, come additivi ossigenati per biodiesel ed anche per benzina oppure per diesel, a seconda della lunghezza della catena alchilica dell'alcol

impiegato. L'uso energetico sta attraendo sempre maggiore interesse visto la necessità sempre più pressante di sostituire, almeno parzialmente, i combustibili fossili con biofuels. I levulinati hanno rivelato in prove motore ottime potenzialità come fuel additives, spesso coniugando buone prestazioni motoristiche a buone capacità lubrificanti e basse emissioni.

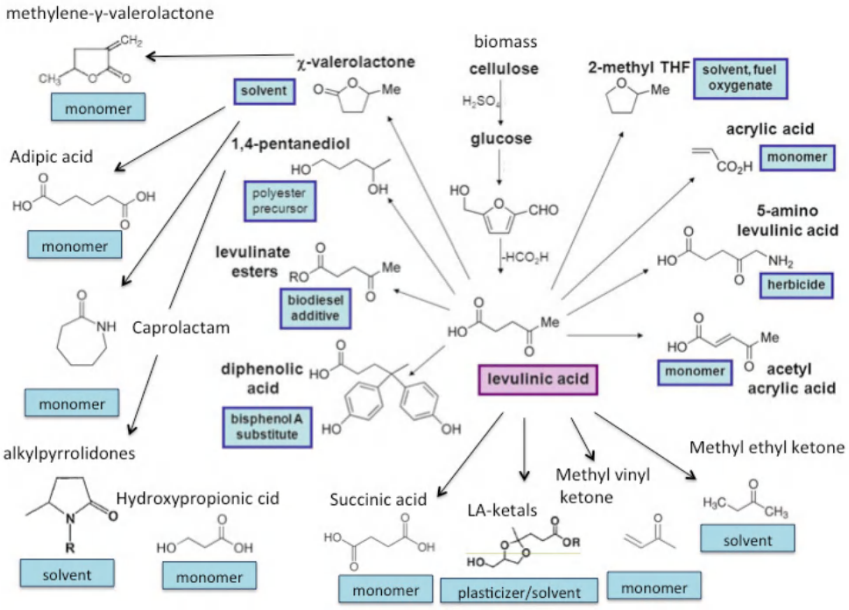


FIG. 2 - PRODOTTI OTTENIBILI DA ACIDO LEVULINICO IN PROCESSI MONO- O MULTI-STADIO

STATO DELL'ARTE IN ITALIA ED ALL'ESTERO

In Italia la più importante realtà industriale per la sintesi dell'acido levulinico è rappresentata da GF Biochemicals, che ha recentemente acquisito anche la statunitense Segetis. Entrambe le aziende hanno una vasta proprietà brevettuale che copre sia la sintesi dell'acido levulinico che la sua purificazione e le successive reazioni di conversione (in particolare la chetalizzazione). L'impianto GF Biochemicals di Caserta, che ha iniziato la produzione nel 2008 inizialmente adottando la tecnologia dell'americana Biofine, per poi migliorare e scalare significativamente tutti gli stadi di processo portandolo fino ad un potenziale livello produttivo di 1000 tonnellate/anno nel 2017. Il processo ottimizzato adotta per lo stadio di conversione della biomassa lignocellulosica una catalisi acida minerale, e prevede la valorizzazione sia dell'acido levulinico che dell'acido formico. L'altra azienda italiana che studia a livello di scala di laboratorio la produzione di acido levulinico è l'azienda emiliana Bio-on, in collaborazione con Sadam, ma in questo caso viene adottato un processo di bioconversione a partire da scarti dell'industria saccarifera. Generalmente i processi di bioconversione richiedono condizioni di reazione meno drastiche della catalisi acida, ma necessitano di tempi di reazione molto più lunghi e si ottengono stream molto diluiti in acido

levulinico. Tra le aziende estere che stanno ottimizzando la sintesi industriale dell'acido levulinico da ricordare l'olandese Avantium che ha recentemente sviluppato il processo YXY per la produzione di polietilen furanoato e sta ottimizzando, a livello di impianto pilota, la produzione di metil levulinato ed acido levulinico. La spagnola Tecnicas Reunidas ha appena guidato il progetto LIFE "WALEVA" che ha studiato la conversione della paglia di riso (uno scarto che nella sola Europa incide per 2,4 milioni di tonnellate annue e viene generalmente bruciato) a dare acido levulinico con catalisi acida. Il progetto ha portato alla costruzione di un impianto pilota adesso in fase di ulteriore sviluppo. Anche la statunitense GlucanBio ha scalato ad impianto pilota la produzione di acido levulinico per conversione diretta di biomassa con catalizzatori acidi inorganici . Nel caso della cinese GoldenRace la produzione annua si aggira intorno a 1000 t di acido levulinico, in questo caso prodotto a partire da residui di cereali utilizzando come catalizzatore omogeneo acido fosforico. Anche la cinese Langfang Triple Well ha una produzione su scala industriale di acido levulinico superiore a 1000 t/anno ed è anche produttrice di alchil levulinati.

In linea generale, i diversi processi di produzione dell'acido levulinico e dei levulinati devono di sviluppare e ottimizzare i seguenti punti chiave: 1) scelta della biomassa di partenza, 2) tecnologia del processo, intesa come somma delle singole fasi, ovvero eventuale pretrattamento, reazione e purificazione del prodotto.

1. Scelta della biomassa di partenza: la composizione della biomassa di partenza determina sensibilmente la resa finale in acido levulinico/levulinati, e a tal scopo sono ovviamente preferite biomasse ricche in zuccheri C5 o C6. In linea generale, biomasse lignocellulosiche residuali derivanti da lavorazioni agricole (ad es. paglia di grano e di riso, lolla di riso, stocchi e foglie di mais, bagassa di canna da zucchero) e da colture erbacee dedicate non sono tutt'oggi valorizzate al meglio. Alcune questioni rimangono ancora aperte e irrisolte, come l'irregolarità di disponibilità della stessa tipologia di biomassa nel corso dell'anno, la variabilità composizionale (a volte anche all'interno della stessa specie di lignocellulosica), e gli elevati costi logistici. In generale, la biomassa lignocellulosica contiene circa il 35-45% di cellulosa, il 20-30% di emicellulosa e il 15-25% di lignina, con una variabilità composizionale che dipende principalmente dalla specie di biomassa considerata. Nonostante questo, la flessibilità dei processi di idrolisi e alcolisi, intesa come adattabilità delle diverse biomasse al processo stesso, è ormai riconosciuta.
2. Tecnologia del processo: tradizionalmente, l'acido levulinico o i suoi esteri possono essere prodotti per conversione diretta di biomasse ricche in zuccheri C6, impiegando acido minerali come HCl or H_2SO_4, a diversa concentrazione, in relazione alle condizioni di reazione adottate (principalmente temperatura e tempo). Tutti i processi sono stati messi a punto cercando di rispettare alcuni principi generali: i) elevata resa nel prodotto desiderato, ii) facilità di recupero del prodotto e del catalizzatore, iii) capacità di minimizzare il consumo energetico e la produzione di reflui, limitando al tempo stesso la formazione di sottoprodotti, in particolare umine solide. L'ottimizzazione del processo in questa direzione ha ormai raggiunto negli ultimi tempi una fase di"plateau", dati i valori molto alti di rese raggiunte rispetto alla resa massima teorica ottenibile, sebbene la produzione di sottoprodotti uminici, anche se ridotta,

non sia certo trascurabile. A tal riguardo, la formazione di umine (contenenti prodotti di degradazione dei carboidrati e lignina) impedisce di impiegare un elevato loading di biomassa, un aspetto critico per quanto concerne i successivi requisiti energetici per la concentrazione e purificazione del prodotto. Parte delle umine solide prodotte vengono già destinate alla combustione direttamente in impianto, reintegrando l'energia spesa per il processo stesso. Dal punto di vista della resa nel prodotto desiderato e della sua purificazione, è evidente che l'impiego di biomasse, anche di scarto, ad alto contenuto di cellulosa è preferibile, ma possono essere proposte strategicamente biomasse che abbiano già subito processi di degnificazione e/o di valorizzazione degli estrattivi. In questo modo la purificazione del prodotto target sarebbe più semplice ed il costo della materia prima più basso, permettendo un approccio di valorizzazione integrata in una logica di economia circolare.

Obiettivi strategici

Inutile dire che la situazione delle materie prime e delle risorse fossili del nostro paese rende l'utilizzo di biomasse a basso costo o di scarto altamente strategico per l'Italia, non solo dal punto di vista economico ma anche ambientale. La conversione diretta di biomasse nelle molecole target proposte può rappresentare un'ottima opportunità per molteplici settori industriali, spaziando dalla produzione dei biofuels, a quella dei biotensioattivi, dei biolubrificanti, dei plastificanti, dei solventi, degli intermedi per chimica fine. L'approfondimento di questa tematica ben si presta ad essere inserito in un quadro di collaborazione tra la ricerca accademica ed industriale, possibilmente valorizzando residui di processi industriali già in essere, o in fase di sviluppo. Si candidano come residui ideali da valorizzare quelli ad alto contenuto di cellulosa o di zuccheri, magari già sfruttati per l'estrazione di altri componenti pregiati. Sarebbe auspicabile la creazione di una piattaforma di interesse sia accademico che industriale (coinvolgendo i molteplici settori industriali potenzialmente interessati) in cui coordinare e sviluppare la tematica proposta, permettendo di individuare le materie prime di partenza strategiche per le aziende ed i prodotti target tra quelli proposti. Moltissimi indizi sottolineano come molti paesi europei ed anche i paesi asiatici, Cina e Corea in testa, stiano investendo molte risorse su questa tematica sia a livello di ricerca industriale che accademica: sarebbe un peccato non cogliere o quanto meno approfondire in Italia questa possibilità.

Possibili ricadute occupazionali

La vastità dei settori industriali potenzialmente interessati alla tematica suggeriscono significative ricadute economiche ed occupazionali, dato che i prodotti target, e, più in generale, le molecole ottenibili dalla conversione catalitica della frazione cellulosica sono ad oggi ritenute "sleeping giants". Le ricadute occupazionali sono possibili non solo negli impianti di conversione diretta, ma anche a valle nella valorizzazione dei sottoprodotti/coprodotti o di pregiati estrattivi.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 2

STRATEGIE INNOVATIVE PER LA VALORIZZAZIONE DEI FANGHI DI CARTIERA

I fanghi di disinchiostrazione, più comunemente conosciuti come "Fanghi di Cartiera" sono un rifiuto industriale non pericoloso ottenuti dal trattamento (deink) della carta da macero, dopo opportuna macinazione, per consentire il riutilizzo nella produzione di carta tissue.
Si stima che in Europa, la produzione annua di fanghi di disinchiostrazione (fanghi deink) si attesti intorno a 3.37 milioni di tonnellate di cui solo il 29% vengono riutilizzati industrialmente (es. ambito agricolo, ambito civile, recupero energetico, materiali per la rimozione di inquinanti), mentre della restante parte circa il 46% viene smaltito per incenerimento, il 4% in discarica e circa il 21% per applicazioni in ambito agricolo (es. condizionamento suolo e ripristino ambientale), con un costo medio di smaltimento di circa 30-35€/ton. Risulta chiaro quindi che l'individuazione di nuovi ampi spazi di rimpiego dei fanghi di deink può promuovere un maggiore impiego della carta da macero (e quindi incentivarne il recupero dai rifiuti urbani) per la produzione della carta tissue ed al contempo ridurre la frazione destinata all'incenerimento, con maggiori benefici di natura ambientale ed economica.

Nuove prospettive di reimpiego dei fanghi di deink possono arrivare dal loro impiego nell'industria edilizia come additivi in paste cementizie, sia in quanto dal punto di vista tecnologico la composizione merceologica dei fanghi li rende adatti ad essere impiegati in miscela con prodotti cementizi, sia in quanto la produzione di cemento europea permette di assorbire la totale produzione europea di fanghi. Riuscire a valorizzare un rifiuto, come i fanghi di disinchiostrazione, è dunque un'operazione vantaggiosa in primis per l'ambiente, poi, logicamente, per l'industria che lo produce e per l'attività produttiva che decide di sfruttare quella che può divenire a tutti gli effetti una risorsa.

MOTIVAZIONE STRATEGICHE PER LO SVILUPPO

Le cartiere rivestono un ruolo decisivo nell'economia circolare utilizzando ogni giorno materie prime rinnovabili provenienti dalla raccolta differenziata. Nonostante l'impiego di materiali riciclati, tuttavia, al termine del processo di lavorazione, anche le cartiere producono residui di produzione. I rifiuti, infatti, costituiscono un elemento imprescindibile dell'attuale modello non solo di produzione ma anche di consumo, perciò tutte le imprese dovrebbero rivedere il proprio modello di business e il loro approccio a favore di un'economia circolare che miri proprio all'eliminazione finale degli scarti di lavorazione. Occorre quindi un superamento del tradizionale modello di economia lineare in cui il ciclo di vita dei beni inizia con l'estrazione delle materie prime, continua con la conversione in semilavorati e prodotti finiti e finisce, dopo il loro impiego, con lo smaltimento e l'eliminazione degli scarti e dei prodotti. L'obiettivo è rimuovere la fase dello smaltimento dei rifiuti a favore di un nuovo riutilizzo.

Il riutilizzo degli scarti e dei sottoprodotti dell'industria cartaria sta divenendo, dunque, per il settore, così come per molti altri comparti, uno degli aspetti più importanti, anche in chiave competitiva. Verso questa problematica si stanno profondendo i maggiori sforzi, con lo scopo di ridurre l'impatto ambientale legato alla produzione della carta, ricercando soluzioni sia indirizzate alla diminuzione della richiesta di materie prime vergini e di energia non autoprodotta, sia finalizzate alla riduzione dei flussi di rifiuto da avviare a smaltimento. In questa ottica l'uso di carta riciclata nell'industria cartaria si introduce perfettamente, sposando appieno i dogmi dell'economia circolare.

Con il termine carta da macero o fibre di recupero si intende quella carta che ha già servito allo scopo per la quale è stata fabbricata e che viene riutilizzata nel ciclo produttivo della carta tissue, in parziale sostituzione della cellulosa vergine. Per poter riutilizzare questa carta, si effettua uno spappolamento del macero che è trattato per via chimica e meccanica, allo scopo di condurre alla separazione delle fibrille di cellulosa dagli inchiostri (disinchiostrazione) e dalle cariche minerali contenute nella carta da macero. Un'efficiente disinchiostrazione del macero è un prerequisito essenziale per l'utilizzo di questa materia prima secondaria nel ciclo produttivo. I fanghi prodotti dal processo di disincrostazione, sono costituiti da fibre frammentate, particelle di inchiostri e materiali di carica. Il riuso della carta da macero, che l'economia circolare vorrebbe incentivare, è fortemente condizionata dalle modalità di riuso, o smaltimento, dei fanghi di deink. La quantità di fango da disinchiostrazione (fango deink) generata durante la produzione di carta tissue può arrivare fino a 150 kg di sostanza solida/tonnellata di prodotto, e in Italia se ne producono circa 400.000 tonnellate/anno.

A livello Europeo, solo il 29% dei fanghi di deink prodotti vengono riutilizzati industrialmente. Della restante parte circa il 46% viene smaltito per termodistruzione, il 4% in discarica e circa il 21% per applicazioni in ambito agricolo (es. condizionamento suolo e ripristino ambientale). Risulta chiaro quindi che l'individuazione di nuovi ampi spazi di rimpiego dei fanghi di deink può promuovere un maggiore impiego della carta da macero (e quindi incentivarne il recupero dai rifiuti urbani) per la produzione della carta tissue ed al contempo ridurre la frazione destinata alla termodistruzione, con maggiori benefici di natura ambientale. D'altra parte, è nota l'esigenza dell'industria edilizia, di ridurre l'impiego delle cellulose come modificatori reologici di composizioni adesive e malte, impiegati per evitare sedimentazione e tempi lunghi di agitazione prima dell'uso, come pure per evitare colature e perdite di acqua quando le composizioni vengono applicate.

Tali modificatori, idrossietil cellulosa e relativi derivati cellulosici, vengono tipicamente prodotti da una fonte di pasta chimica sbiancata, pertanto, la produzione di tali derivati cellulosici prevede, non solo, l'impiego della parte costosa ottenuta dalla cartiera nella lavorazione del legno, ossia la pasta ricca in cellulosa, ma anche la reazione e dissoluzione della stessa in soluzioni caustiche e concentrate, risultando così i derivati di cellulosa additivi estremamente costosi per l'industria edilizia e per l'ambiente.

Considerando che la composizione merceologica dei fanghi di deink (prevalentemente carbonato di calcio e fibre di cellulosa) la rende adatta ad essere impiegata in miscela con prodotti cementizi, dato che tipicamente entrambi questi componenti sono presenti nei leganti idraulici, il primo come reagente ed il secondo come modificatore reologico, appare evidente che l'industria cemen-

tizia è idonea per un eventuale rimpiego dei fanghi di deink. Inoltre, considerando che dal punto di vista del mercato, la produzione di cemento Europea nel 2014 è stata stimata intorno a 245 milioni di tonnellate e ipotizzando l'utilizzo di appena 1-2% di fango nel cemento come additivo, ovvero circa 2.5-5 milioni di tonnellate, sarebbe possibile assorbire la totale produzione Europea di fanghi che è stata stimata intorno a 3.37 milioni di tonnellate. Da quanto detto risulta, quindi, che la messa a punto di una composizione adesiva per l'edilizia, derivata dai fanghi di deink, può rappresentare una strategia vincente sia per ridurre il carico di materiale di scarto derivante dalla produzione della carta tissue, sia per ridurre la quantità di cellulosa, e conseguentemente il costo di produzione, delle composizioni adesive leganti per l'edilizia.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Ad oggi, sia a livello nazionale che a livello europeo, i fanghi di deink vengono utilizzati, prevalentemente per le seguenti applicazioni:

- ***Produzione di laterizi alleggeriti***

La porosizzazione o alleggerimento dei laterizi viene effettuato per conferire ai mattoni proprietà isolanti e per ridurre i consumi di materie prime pregiate quali l'argilla. La realizzazione di questi laterizi viene effettuata aggiungendo all'impasto tradizionale di argilla, acqua e sabbia, materiali di origine naturale o sintetica a granulometria fine che, durante la cottura, si decompongono emettendo gas e lasciando microalveoli vuoti, fra loro non comunicanti e uniformemente diffusi nella massa d'argilla. Questa microporosità conferisce al mattone un elevato grado di isolamento termico.

I fanghi di cartiera, essendo costituiti sia da una parte organica che da una parte inorganica, vengono diffusamente utilizzati per la produzione di laterizi alleggeriti in alcuni paesi, e numerose sono le pubblicazioni che riportano tale impiego. L'aumento della percentuale del rifiuto cartario all'interno del mattone causa una riduzione della densità, ma provoca un aumento dell'assorbimento d'acqua e una riduzione della resistenza alla compressione. La percentuale ottimale, influenzata anche dalle temperature adoperate durante la cottura, è pari al 10% di peso.

- ***Produzione di pannelli***

I fanghi provenienti dal processo di disinchiostrazione possono essere impiegati nella produzione di pannelli di fibre duri (hardboard), usando anche il 100% di fango o in miscela con fibre usate per la produzione di MDF (Medium Density Fiberboard). Questi pannelli, che possono essere usati come materiale di supporto, sono economicamente vantaggiosi e riducono il consumo di energia perché quantità minori di legno dovranno essere raffinate. Si possono realizzare anche pannelli non compressi (softboard), con un'elevata percentuale di fango (circa 80% in peso) mescolata con fibre MDF e resina fenolica. Il risparmio c'è anche quando, a causa di un maggiore uso di fango, si rende necessario un utilizzo maggiore della resina fenolica. Come nel caso precedente, uno dei vantaggi principali risiede nel fatto che il manufatto è costituito per l'80% da materiale di scarto, è leggero ed ha una buona resistenza all'umidità. Tuttavia, accrescere la percentuale di fango in questo prodotto significa diminuire la resistenza alla flessione e la durezza.

- ***Produzione di cemento***

Il cemento è un legante idraulico, ossia un materiale inorganico finemente macinato che, quando mescolato con acqua, forma una pasta che fa presa e indurisce a seguito di processi di idratazione. Il cemento conforme alla norma EN 197-1, opportunamente dosato e miscelato con aggregato e acqua, deve essere in grado di produrre una malta o un calcestruzzo che deve essere lavorabile per un certo periodo di tempo e deve raggiungere livelli di resistenza meccanica prestabiliti nonché di possedere una stabilità di volume a lungo termine. L'indurimento idraulico del cemento è dovuto principalmente all'idratazione dei silicati di calcio, ma anche altri composti, per esempio gli alluminati, possono partecipare al processo di indurimento. L'attività pozzolanica consiste nella capacità di combinarsi con la calce liberata dall'idratazione del cemento per produrre idrosilicati di calcio. È stato dimostrato che i fanghi di cartiera calcinati a temperature tra i 700° e gli 800°C possono essere aggiunti al cemento. Ad alte temperature infatti la caolinite, presente nei fanghi, si trasforma in meta-caolinite, un materiale amorfo di composizione $Al_2O_3 \bullet SiO_2$, che ha un'elevata attività pozzolanica. La percentuale migliore risulta essere il 10% e i cementi a cui è stato addizionato il fango vengono incontro ai requisiti fisici e chimici richiesti dalle normative europee UNI EN 197-1.

- ***Produzione di green pallet***

I fanghi di cartiera vengono considerati come un'alternativa ai trucioli di legno nella produzione di pallets che prendono il nome di green pallet dal momento che l'impiego di una risorsa di riciclo costituisce un'azione virtuosa dal punto di vista ambientale. I composti legno-fanghi di cartiera (10-15%), realizzati usando come legante un resina urea-formaldeide, hanno mostrato una perdita di resistenza meccanica con l'aumentare della percentuale di fango e una diminuzione della resistenza alla flessione causata dalle piccole dimensioni delle fibre di cellulosa, rispondendo comunque ai requisiti minimi richiesti. Usando fibre di dimensioni più grandi non è stato notato un decremento della resistenza alla flessione, almeno per una percentuale pari al 10% in peso, rispetto ai composti di soli trucioli di legno.

- ***Sintesi di zeoliti***

Le zeoliti sono alluminosilicati con struttura cristallina, con struttura basata su un reticolo tridimensionale di tetraedri di AlO_4 e SiO_4 che contengono cationi alcalini e alcalino-terrosi che possono essere scambiati. Le zeoliti si trovano in natura e vengono sintetizzati da un'ampia varietà di materiali di partenza a base di Si e Al. In ambito edilizio possono essere utilizzati come un componente di premiscelati (aggregato leggero per malte e conglomerati cementizi). Le ceneri dei fanghi di cartiera, grazie al contenuto di fasi amorfe e cristalline che si formano in seguito ad incenerimento, possono essere usate per sintetizzare le zeoliti. In passato, minerali argillosi come la caolinite venivano usati come cariche nella produzione della carta, ma recentemente la calcite ha, in modo crescente, sostituito la caolinite. Quindi le ceneri che si ottengono oggi dai fanghi hanno un elevato contenuto di calcio. Inoltre la riduzione dell'uso di minerali silicatici come cariche per la carta ha prodotto una concentrazione di silicio più bassa e quindi una diminuzione del rapporto Si/Ca. Il basso contenuto di silicio nelle ceneri rende difficoltosa la conversione in zeoliti e rende

necessaria una fonte esterna di silicio, come la diatomite, una roccia sedimentaria organogena silicea. È quindi possibile la sintesi di zeoliti a bassa temperatura (90°C), utilizzando il fango di cartiera, ma è necessaria la miscelazione con un altro materiale per valorizzarlo pienamente.

- ***Recupero della lignina***

La lignina è una molecola naturale complessa costituita da diverse unità di fenilpropano. Dopo i polisaccaridi rappresenta la struttura organica più presente nei vegetali. La lignina svolge diverse funzioni fondamentali per la vita del vegetale. Il principale compito svolto dalla lignina è quello di ridurre la permeabilità all'acqua intervenendo in tutti i processi di scambio di minerali, nutrienti e metabolici. L'estrazione dai fanghi avviene in ambiente basico, è sufficiente una soluzione di NaOH all'1%. Il processo necessita di temperature attorno ai 150-200°C e tempi dell'ordine di 30 – 60 minuti. La lignina viene così separata e poi riprecipitata a pH 5 e trova numerosi impieghi.

Nuovi spazi di reimpiego dei fanghi di deink: additivo in paste cementizie

Come precedentemente osservato, le strategie e tecnologie ad oggi utilizzate, consentono solo un marginale riutilizzo dei fanghi di deink, lasciando ampio margine alla possibilità di una loro innovativa modalità di valorizzazione anche per altri usi e in ambiti applicativi particolari. Recentemente è stata sorprendentemente scoperta la possibilità di addizionare i fanghi di deink, opportunamente macinati e setacciati, come additivo nelle composizioni adesive per sostituire parte dei derivati cellulosici, permettendo quindi un impiego alternativo del fango e evitandone così i relativi costi di smaltimento.

In considerazione della composizione dei fanghi di deink, costituiti principalmente da $CaCO_3$ (65-70%) e cellulosa (28-30%) alcuni ricercatori hanno, infatti, considerato di valutare il loro impiego come additivo per gli impasti cementizi, dal momento che tipicamente le fibre di cellulosa o derivati solubili di essa, tipo la metil-idrossi-etilcellulosa (MHEC) vengono impiegati come additivi reologici. I ricercatori hanno scoperto che il fango derivante da processi di disinchiostrazione nel riciclaggio della carta, avente una distribuzione granulometrica nell'intervallo tra 50 e 400 μm, non è un semplice inerte, ma presenta caratteristiche di stabilizzazione in presenza di acqua e caratteristiche reologiche specifiche, tali da costituire materiale attivo nelle composizioni adesive edilizie.

Nel complesso, i ricercatori hanno scoperto che tale sottoprodotto, impiegato come additivo in formulati cementizi (leganti inorganici), ha sorprendenti proprietà tecnologiche, quali ad esempio:

- incrementare la ritenzione dell'acqua di impasto;
- tissotropizzante intesa come additivo atto a incrementare la capacità del materiale di essere applicato su alti spessori senza mostrare significativi abbassamenti;
- ritardante della skim formation intesa come la capacità dell'additivo di ritardare la formazione di una pelle sullo strato superficiale dell'adesivo, e quindi anche come incrementatore della bagnabilità, particolarmente importante per allungare i tempi di lavorabilità durante l'accoppiamento dei pannelli con la schiuma nel sandwich;
- stabilizzante anti cedimento in fase plastica in adesivi, intesa come modificatore di reologia che permette, al momento in cui vengono meno gli sforzi di taglio applicati al materiale du-

rante il mescolamento, di migliorare la stabilità dimensionale a parete del materiale (per applicazioni in verticale);
- compensatore di ritiro in fase plastica di malte, inteso come la capacità del materiale di ridurre il naturale ritiro igrometrico delle malte in fase plastica.

Tali proprietà sono risultate direttamente sfruttabili in diverse tipologie di adesivi cementizi e malte impiegabili nell'edilizia. Più in particolare, il fango di deink, qualora impiegato in composizioni adesive, quali malte, calcestruzzi, intonaci, rasanti o adesivi, aumenta la ritenzione d'acqua, aumentando così il tempo di essiccamento, e quindi la stabilità, nonché la lavorabilità. Qualora impiegato in malte fluide, anche adatte al pompaggio, il fango aumenta la tissotropia, intesa come capacità di non colare da pareti verticali e non cambiare il suo spessore dopo l'applicazione. Inoltre il fango deink nelle composizioni adesive riduce la formazione di schiuma, intesa come formazione di un film secco sulla superficie che riduce la sua resistenza adesiva. Esso inoltre aumenta la bagnabilità delle superfici, per esempio nell'applicazione di piastrelle e negli intonaci, mentre nelle malte il fango riduce il ritiro agendo da additivo compensatore nella fase di essiccamento.
Lo sfruttamento del fango di deink come additivo in paste cementizie, in un'ottica di economia circolare, rappresenta, dunque, un'innovazione a basso costo e ad elevato valore aggiunto, con importanti ricadute ambientali ed economiche su cui puntare per promuovere l'avanzamento dei settori cartario e edilizio.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE PER LO SVILUPPO

L'opportunità che l'innovativa modalità di valorizzazione dei fanghi di deink offre sia al settore cartario che a quello edilizio ha l'enorme vantaggio di essere a basso costo, in quanto la conversione dei fanghi da materia seconda a materia prima, richiede solo la loro macinazione e una valutazione di massima delle sue proprietà. In base all'esperienza storica, infatti, le caratteristiche dei fanghi sono piuttosto costanti in quanto:
- il tenore di umidità è compreso tra il 2 ed il 15%
- la presenza di metalli pesanti è modestissima
- la distribuzione tra componente inorganica (prevalentemente costituita da $CaCO_3$) ed organica (cellulosa) indicativamente con rapporto 65-70/25-30 p/p.

Non sono dunque necessari, in linea generale, particolari trattamenti al fine di normalizzare le caratteristiche di ingresso nel ciclo di recupero dei fanghi di deink. Lo sviluppo e l'adozione di questa innovazione da parte delle imprese, dunque, non richiede la mobilitazione di importanti risorse economiche.

POTENZIALE RICADUTA OCCUPAZIONALE

In termini occupazionali, sono ipotizzabili benefici (diretti e indiretti) legati allo sviluppo di una filiera dedicata al recupero dei fanghi dalle cartiere, alla loro analisi, alla loro macinazione, e alla loro distribuzione ai produttori di adesivi per l'edilizia. È inoltre ipotizzabile un beneficio in termini

di ricadute occupazionali, legato allo sviluppo di figure professionali dedicate alla formulazione di ricette customizzate per l'edilizia, sulla base delle caratteristiche e proprietà dei fanghi di deink, dei materiali a quali viene miscelato e dello specifico utilizzo finale.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 3

UTILIZZO DI SCARTI AGROALIMENTARI NELLA TECNOLOGIA DELL'INDUSTRIA CONCIARIA

L'Europa è uno dei principali players nella produzione di pellame (19% della produzione mondiale), tra i vari paesi europei l'Italia può considerarsi il principale player con un valore della produzione corrispondente a circa il 65% della produzione Europea. Circa l'85% della pelle prodotta è conciata al cromo per calzature, abbigliamento, arredo e interni auto. Nel marzo 2014 l'Europa ha pubblicato un regolamento che vieta la messa in commercio di articoli in pelle contenenti concentrazioni di Cr VI superiori a 3 mg/kg, ma le grandi case di moda hanno dichiarato di volere un'alternativa definitiva alle pelli al cromo, che saranno bandite dal 2020.

In questo contesto, ricercatori, accademici e industriali, hanno rivolto la loro attenzione allo sviluppo di soluzioni concianti sostitutive al cromo. La messa a punto di processi tecnologici che consentono di trasformare sostanze di origine naturale, rendendole idonee per essere impiegate per la produzione di agenti concianti antiossidanti destinati ai processi di concia e riconcia cromo free, costituisce una risposta efficace al problema della sostenibilità del processo conciario. La possibilità di utilizzare, come sostanza di origine naturale, prodotti di scarto provenienti da settori produttivi diversi, il cui smaltimento ad oggi costituisce un costo sia per le aziende sia per l'ambiente, promette, inoltre, vantaggi dal punto di vista del miglioramento della sostenibilità di settori produttivi critici, come quello agroalimentare, rispondendo perfettamente alla definizione di economia circolare.

Particolare interesse, in questo ambito, riscuote la recente messa a punto di processi tecnologici in grado di valorizzare le acque di vegetazione olearia (AVO), trasformandole da rifiuto a materia prima per la produzione di agenti concianti antiossidanti destinati alla realizzazione di articoli in pelle innovativi cromo-free e/o conciati al cromo ma riconciati con un agente che impedisce la formazione del Cromo VI. Considerando che lo smaltimento delle AVO costituisce uno dei maggiori problemi ambientali nel bacino del Mediterraneo, in particolare per paesi come Spagna, Italia e Grecia, che sono i principali produttori mondiali di olio d'oliva, risulta evidente l'impatto socio-economico derivante dalla messa a punto del processo di valorizzazione e riqualificazione di questo scarto dell'industria agroalimentare. I nuovi processi tecnologici messi a punto, dunque promettono importanti ricadute in termini di salute e sicurezza per i lavoratori e per i consumatori, nonché, in cascata, una maggiore sostenibilità ambientale ed economica dei processi produttivi coinvolti, che si estende globalmente a livello europeo, in quanto l'Europa e l'Italia sono i principali produttori mondiali sia di olio d'oliva che di pellame.

MOTIVAZIONE STRATEGICHE PER LO SVILUPPO

Nel sistema Moda, i principali gruppi ed i grandi marchi al fine di rendere i propri prodotti sempre aderenti alle specifiche legislative esistenti nei diversi paesi di commercializzazione e "qualifica-

re" il proprio prodotto, sia da un punto di vista ambientale che di "sicurezza per il consumatore", hanno introdotto nei propri capitolati tecnici una corposa sezione riguardante numerosi parametri eco-tossicologici. In questo contesto, sia i produttori di prodotti chimici, sia le concerie, stando al passo con le continue evoluzioni di un Sistema Moda globalizzato, devono adeguare i loro processi affinché tali regolamenti vengano rispettati (es. REACH, OEKO-TEX).

Nella gestione dei prodotti della filiera Moda inoltre, si è innescato un sempre crescente interesse verso capitolati di tipo "volontario" (DETOX di Green Peace e MRSL) che, a loro volta, descrivono nei propri disciplinari, ulteriori parametri e richieste restrittive, difficilmente raggiungibili con le tecniche di produzione normalmente utilizzate, poiché non vengono richiesti esclusivamente criteri di sicurezza chimica dei processi e dei prodotti, ma principalmente fattori di sostenibilità ambientale del ciclo di vita degli articoli commercializzati (es. prodotti metal free, biodegradabilità e riciclabilità dei prodotti stessi a fine vita).

Quantificando la problematica, a livello nazionale la produzione di articoli in pelle nel 2015 è stata di circa 123.6 kton. Il pellame per calzatura interamente prodotto da pelli conciate al cromo è circa il 51.6% ovvero 63.8 kton, mentre per abbigliamento è circa 31.3% di cui l'80% conciato al cromo, per un totale di 30.9 kton. Pertanto per i due principali settori d'impiego nel 2015 sono state prodotte circa 94.7 kton di pelli conciate al cromo. Considerando che, nel caso di concia convenzionale al cromo di pelli bovine, si parte da 1.000 kg di pelli salate fresche per ottenere 200-250 kg di pelli finite, utilizzando 400-600 kg di reagenti e 20-40 m^3 di acqua, e che al termine del processo, questi quantitativi di acqua si ritrovano come acque reflue, generando circa 500 kg di fanghi che si aggiungono agli oltre 500 kg di rifiuti/scarti solidi, è facilmente intuibile la portata della problematica. Ancora più evidente risulta la portata della problematica se si considera che nel caso della concia al Cr, i fanghi di risulta contengono dallo 0,5% al 5% sulla sostanza secca di Cr III.

Di fatto, i processi innovativi che consentono di produrre agenti concianti senza cromo, forniscono una soluzione per eliminare definitivamente il cromo come conciante, quindi con una particolare attenzione non solo al consumatore, ma anche al sistema MODA, in termini di miglioramento della salubrità degli ambienti di lavoro e di miglioramento della qualità dei reflui prodotti. In questo contesto, dunque, lo sviluppo di soluzioni in grado di migliorare la sostenibilità ambientale dei processi produttivi conciari, preservando la qualità dei pellami prodotti, è un obiettivo strategico in grado di condizionare la sopravvivenza e l'avanzamento del settore, come dimostrano i numerosi progetti di ricerca europei riguardanti lo sviluppo di strategie per la sostituzione dei prodotti chimici attualmente utilizzati nell'industria conciaria, con prodotti naturali a basso impatto ambientale (es. Lifetan, Bionad, Ecodefatting, Podeba, Ecofatting, Oxanm, Goast, Tannow).

Lo smaltimento delle AVO, d'altra parte, costituisce uno dei maggiori problemi ambientali nel bacino del Mediterraneo, in particolare per Paesi come Spagna, Italia e Grecia che sono i principali produttori mondiali di olio d'oliva. In relazione ai processi produttivi dell'olio d'oliva, si consideri che per 100 kg di olive si ottengono circa 70-100 kg di AVO. In Italia si calcola che vengano prodotti annualmente circa 3 milioni di tonnellate di residui oleari, di cui i 2/3 costituiti da AVO (nel mondo si stima che siano 30 milioni di tonnellate/anno), si calcola inoltre, che l'impatto ambientale prodotto da 1 m3 di AVO sia equivalente a quello prodotto da 200 m3 di acque reflue urbane. La messa a punto di un processo in grado di valorizzare le AVO re- immettendole in un ciclo produt-

tivo, anziché doverle smaltire, rappresenta, dunque, un'importante motivazione strategica per lo sviluppo dei nuovi processi produttivi e dei nuovi prodotti.
L'impiego delle AVO nei processi conciari, tali quali in sostituzione dell'acqua, e di loro derivati polimerici, rispetto allo smaltimento e allo spandimento in agricoltura, risulta un'idea di business semplice, efficace ed a basso costo, nonché sostenibile da punto di vista ambientale perché non si producono sottoprodotti. Grazie al contenuto dei vari composti fenolici, le AVO ed i loro derivati rappresentano dunque, dopo opportuna trasformazione, una risorsa a basso costo. Oltre alla riduzione del consumo di acqua nei processi, e dei tannini sintetici (contenenti formaldeide) e naturali, il vantaggio atteso è quello di sfruttare il forte potere antiossidante delle AVO per aumentare la solidità alla luce delle pelli e limitare l'ossidazione del cromo a Cr VI, quando usate su pelli al cromo.
Tale strategia, per altro risulta assolutamente sostenibile in quanto, ad esempio a livello nazionale, la richiesta di AVO per coprire l'intero fabbisogno del comparto conciario nazionale, rappresenta circa il 20% della quantità disponibile in Italia. Lo sviluppo di processi di valorizzazione delle AVO per la produzione di nuovi agenti concianti per realizzare articoli in pelle innovativi crome-free, risponde, dunque al bisogno di due importanti comparti (quello conciario e quello olivicolo) con un'unica soluzione che consente la valorizzazione delle AVO, che non dovranno più essere smaltite, e la produzione di un conciante cromo- free e/ o di un conciante in grado di impedire la formazione del Cromo VI. Lo sviluppo dei nuovi processi assume, dunque, un ruolo strategico per il miglioramento della sostenibilità e della competitività dei settori coinvolti.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

La messa a punto di processi tecnologici in grado di valorizzare le acque di vegetazione olearia (AVO), trasformandole da rifiuto a materia prima per la produzione di agenti concianti antiossidanti destinati alla realizzazione di articoli in pelle innovativi cromo-free (e/o conciati al cromo ma riconciati con un agente che impedisce la formazione del Cromo VI), fa parte del segmento dei Leather Chemicals per l'impiego Tanning & Dyeing. Secondo un'analisi di mercato del 2014, il segmento Tanning Chemicals è stato stimato a livello mondiale attorno ai 2.2 miliardi di dollari con un trend di crescita nel periodo 2014-2020 di circa il 2%, corrispondente a circa 2.5 miliardi di dollari. Lo stesso trend di crescita è atteso anche a livello europeo con un incremento del volume da circa 570-590 milioni di USD a 664 nel 2020.
Il mercato dei Tannery Chemicals è essenzialmente trainato dal mercato della pelle e della moda, dominato dall'Italia, grazie ai tre importanti poli conciari di Arzignano (VI), S. Croce sull'Arno (PI) e Solofra (AV). L'altro importante driver del mercato dei Tannery Chemicals è rappresentato dalle nuove soluzioni ecosostenibili, che promuovono la ricerca di prodotti innovativi. Tra questi, in relazione al nuovo regolamento che vieta il commercio di pellame contenente Cr VI sopra il limite di 3 mg/kg, si pongono iniziative in via di sviluppo, come l'utilizzo di tannini derivanti dai chicchi d'uva, o la messa a punto di estratti acquosi delle foglie di olivo.
Il vantaggio competitivo rappresentato dai prodotti ottenuti grazie ai nuovi processi tecnologici di trattamento delle AVO, risiede nelle caratteristiche innovative di questi prodotti che hanno sia potere conciante che antiossidante, a differenza di altri nuovi prodotti impiegati per le conce me-

tal-free che hanno solo potere conciante. La frazione fenolica delle AVO, infatti, risulta di interesse tecnologico grazie al suo effetto conciante del pellame e all'elevato potere antiossidante. Inoltre, i prodotti concianti derivanti dalle AVO non necessitano di biocidi, grazie alla presenza dei polifenoli che hanno anche effetto preservante, sono cost- effective, in quanto il processo di arricchimento è economico, e il loro sviluppo su scala industriale non è ostacolato da problemi di reperimento della materia prima.

Nel dettaglio, l'innovativo processo di valorizzazione delle AVO, prevede di trasformare queste sostanze di scarto da rifiuto a materia prima, mediante uno specifico processo che arricchisce la frazione fenolica nei componenti altamente antiossidanti, inoltre prevede di impiegare le AVO arricchite per la produzione di agenti concianti antiossidanti destinati ai processi di concia e riconcia del pellame. Studi sperimentali hanno dimostrato il possibile ed efficace utilizzo di AVO nella fase di rinverdimento delle pelli, l'elevato potere conciante delle AVO, l'efficacia delle AVO come agente coadiuvante di concia, che permette di ottenere bagni estremamente performanti, l'incremento del potere conciante delle resine di poliacrilato di sodio in miscela con le AVO e l'efficacia delle AVO nell'inibire la formazione del Cromo VI, se usate in fase di riconcia della lavorazione delle pelli.

In tabella 1 si riportano i risultati del potere conciante delle AVO in confronto con i tannini più comunemente utilizzati (metodo normato Chambort-Jamet).

TABELLA 1- VALUTAZIONE DEL POTERE CONCIANTE

Conciante	Fenoli assorbiti (%)
AVO	82,94
TARA	91,71
MIRABOLANO	86,75
CASTAGNO	90,20
MIMOSA	91,32

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE PER LO SVILUPPO

L'analisi del mercato evidenzia l'assenza di barriere all'ingresso nel mercato target dei prodotti concianti derivati dalle AVO. Dal punto di vista delle risorse necessarie per lo sviluppo industriale dei prodotti, sia il trattamento delle AVO da rifiuto a materia prima seconda, sia la loro trasformazione in polimeri, sono realizzabili mediante tecnologie che non richiedono un elevato livello tecnologico (e quindi importanti investimenti).

Difatti il trattamento delle AVO da rifiuto a materia prima seconda può essere condotto mediante un processo di stabilizzazione impiegando azoto che favorisce l'arricchimento dei fenoli antiossidanti, e successivamente mediante un secondo trattamento di stabilizzazione microbiologica mediante derivati del cloro (come per il trattamento delle acque per consumo umano), mentre in relazione alla polimerizzazione delle AVO, il processo è realizzabile con i reattori di polimerizzazione tipicamente utilizzati per la produzione di altri prodotti, quali i tannini ausiliari e le resine concianti.

POTENZIALE RICADUTA OCCUPAZIONALE

Sostituendo gli estratti vegetali di importazione con polimeri derivati AVO, si prevede la creazione di un nuovo settore produttivo specializzato nella fabbricazione di polimeri, con un importante incremento occupazionale. Il mercato a cui si rivolge un polimero derivato AVO è molto ampio, grazie alla particolare versatilità di impiego del prodotto, quindi si prevede un significativo sviluppo delle vendite nel settore conciario.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 4

VERNICI E PITTURE DA MATERIE PRIME D'ORIGINE BIO-RINNOVABILE A SCALA INDUSTRIALE

La necessità di cambiare il nostro intero modello economico e produttivo da uno basato sugli idrocarburi di origine fossile ad uno basato su materie prime bio-rinnovabili (definite qui in senso generale come quelle derivanti da fonti biologiche di rapida ricrescita e/o da materiali riciclati) diventa sempre più chiara. Il cambiamento climatico a livello globale, e l'inquinamento atmosferico, del suolo e dell'acqua a livelli locali, entrambi richiedono una diversa gestione delle risorse naturali del nostro pianeta.

C'è ora un forte pull da parte del pubblico, con un valore aggiunto maggiore per prodotti e servizi che abbiano una componente bio-rinnovabile e un ridotto impatto climatico e ambientale in generale, come misurato da LCA (Lifetime Cycle Assessment). C'è anche un crescente technology push, con sempre più materiali di base o intermedi con tali caratteristiche che vengono messi sul mercato. In generale, grazie a questi nuovi materiali, in molti settori è già possibile non solo replicare le prestazioni e caratteristiche di prodotti esistenti ma anche ottenere prestazioni e caratteristiche innovative grazie alle differenze tra i materiali bio-rinnovabili e quelli di origine fossile, specialmente petrolifera.

Si può dire, in generale, che partire da materiali bio-rinnovabili può rivelarsi in realtà più fruttifero quanto a composti chimici utili, dell'attuale chimica quasi interamente basata sulle componenti del petrolio. Infatti, viene ora sostenuto da più parti, rendere reattivi gli idrocarburi petroliferi è difficile, energeticamente dispendioso e causa di notevoli quantità di rifiuti ed emissioni. I materiali bio-rinnovabili sono già forniti dei gruppi reattivi necessari, hanno già una grande varietà di configurazioni, forniscono strutture interessanti non solo primarie, ma secondarie e terziarie che con la chimica del petrolio sono praticamente inaccessibili.

Nel settore delle pitture e vernici, in particolare, è necessario uno sforzo di integrazione verticale che comprenda, in processi a basso impatto, la produzione delle componenti di origine bio-rinnovabile e la formulazione di vernici adatte ad ottenere prodotti finali di lunga durata e/o facilmente riciclabili, secondo i principi dell'economia circolare.

MOTIVAZIONE PER LO SVILUPPO

Il settore delle pitture e vernici è particolarmente importante in Italia. Nel 2017, rappresenta quasi il 10% del nostro settore chimico, per un valore complessivo della produzione di circa 5 miliardi di euro ed un saldo commerciale import/export positivo per quasi 900 milioni di euro (dati da "L'industria chimica in cifre" di Federchimica). È un settore ad alto valore aggiunto che offre lavoro qualificato a tutti i livelli, ed in cui il continuo progresso è condizione necessaria per mantenere e migliorare le posizioni acquisite.

Le tecnologie attualmente utilizzate nel settore pitture e vernici sono quasi completamente basa-

te su materiali di origine petrolchimica per quanto riguarda leganti, solventi ed additivi, con altre componenti derivanti da trasformazione di minerali inorganici per quanto riguarda pigmenti, cariche ed alcuni additivi.
Il settore pitture e vernici ha impatto ambientale in molti anelli della catena di valore: dall'estrazione del petrolio e dei minerali di partenza, ai processi che li trasformano nelle componenti intermedie, al processo di produzione delle vernici stesse con le inerenti emissioni di composti organici volatili (COV) e produzione di rifiuti speciali, infine all'applicazione, ancora con emissione di COV e produzione di rifiuti speciali, oltre al trattamento di fine vita del manufatto verniciato. Per questo è necessario, nello stimarne l'impatto ambientale, considerare non i singoli fattori in isolamento ma l'intera filiera.
Un primo, grande cambiamento, è stato costituito dalla vasta adozione di tecnologie che usano acqua come solvente. Ma queste usano comunque leganti, additivi, pigmenti e cariche uguali o molto simili a quelli delle vernici basate su solventi petrolchimici, con tutti gli associati impatti ambientali. Inoltre, i coalescenti necessari per una corretta formazione delle vernici dalle emulsioni acquose sono solventi a rilascio molto lento che vengono emessi dai manufatti verniciati e tendono perciò a concentrarsi negli ambienti chiusi, ed hanno anch'essi suscitato preoccupazioni legate a effetti sulla salute a lungo termine.
Molto positivo è anche stato lo sviluppo di tecnologie ad alto ed altissimo secco, specialmente a reticolazione radicalica, che però trovano applicazione solo in alcune nicchie (in particolare nelle vernici per legno e, negli inchiostri, per packaging). Rispetto alle vernici all'acqua, questi sistemi presentano maggiore efficienza produttiva, permettendo spesso di ottenere pezzi finiti in minuti o anche secondi invece che ore nel caso precedente. E offrono maggiore efficienza energetica: il volume e peso da mettere in latta e trasportare è solo quello della vernice finale, non comprendendo 60-80% di acqua o solventi organici, e queste componenti volatili non devono essere fatte evaporare, cosa che spesso richiede, per applicazioni industriali, passaggi in forno. Purtroppo, la maggior parte dei leganti usati nelle tecnologie ad alto secco sono tossici o al minimo irritanti, o sospetti di essere carcinogeni.
Sviluppare materiali, specialmente leganti, che abbiano minore impatto ambientale nella loro composizione e nel loro processo produttivo sembra essere il prossimo passo necessario in questo processo di diminuzione progressiva dell'impatto ambientale delle vernici.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Sono sempre esistite vernici e pitture fatte di materiali d'origine naturale. Ancora oggi, sulla base di ricette tradizionali ed antiche numerosi produttori, spesso piccole o micro aziende, offrono prodotti basati su albume d'uovo, proteine del latte, gommalacca, colofonia di gemma, olio di lino o altri simili leganti naturali. I colori possono essere ottenuti anch'essi da fonti naturali, sia che siano pigmenti inorganici che d'origine vegetale o animale, e l'intera filiera può essere controllata e garantita, come nel caso della Spring Color di Castelfidardo. Tuttavia, queste vernici non soddisfano mai i criteri necessari per un uso industriale su larga scala, né per le resistenze meccaniche e di durata ora considerate necessarie, né per la costanza ed affidabilità dei risultati. In quasi tutti i casi, si tratta di prodotti destinati ad un uso artigianale ed applicazione manuale a pennello. I

sistemi produttivi sono anch'essi quasi artigianali, con notevole creazione di rifiuti, emissione di volatili organici, inefficienza energetica e bassa produttività del personale. È probabilmente possibile migliorare questo tipo di prodotti applicando loro moderni metodi prima formulativi poi produttivi, ma non sembra questa la strada più promettente per ottenere ora vernici e pitture adatte ad un largo uso industriale.

Da diverso tempo si lavora, invece, per introdurre l'uso di materiali bio-rinnovabili nella filiera dei prodotti vernicianti di moderna tecnologia. In questo caso, si cerca di ottenere prestazioni almeno uguali a quelle delle vernici composte di materiali di origine petrolchimica e, se possibile, di trovare nuove proprietà permesse dalla particolare natura delle materie prime bio-rinnovabili.

Bisogna innanzitutto considerare quali materie prime bio-rinnovabili sono già presenti nella filiera delle pitture e vernici industriali, a priori dallo sforzo specifico qui discusso. Si scopre così che ci sono leganti, quelli alchidici, che hanno, per definizione, una notevole componente d'origine vegetale, cioè acidi grassi da oli. Nel caso delle alchidiche siccative, sia a solvente che ad acqua, le insaturazioni stesse degli acidi grassi permettono alla resina di reticolare. Nel caso invece delle alchidiche ossidrilate che vengono usate insieme a poliisocianati, aziridine o altri simili tipi di reticolanti secondari, gli acidi grassi conferiscono idrofobicità, lucentezza e corpo alle vernici che li comprendono. Per lo stesso scopo, acidi grassi sono anche usati come componenti aggiuntive in resine acriliche, metacriliche e uretaniche che si definiscono allora "oil-modified". Un'altra componente naturale abbastanza diffusa è la colofonia, usata specie in poliesteri per la sua rigidezza e resistenza chimica. Infine, si può citare l'acido adipico, usato in una varietà di poliesteri come componente flessibile rispetto al rigido ftalato.

Un altro approccio iniziale è considerare quali componenti ora largamente derivate dalla chimica del petrolio possano essere ottenute da fonti bio-rinnovabili per vie chimiche note ed economicamente accessibili. Dato il grande sviluppo già effettuato dalle filiere per la produzione di bio-diesel e bio-etanolo, tutti i sotto-prodotti ed i possibili derivati di quelle filiere diventano immediatamente interessanti. Tra questi c'è, chiaramente, la glicerina, che è anche sottoprodotto della produzione di acidi grassi e può essere usata nei poliesteri. Ci sono poi una varietà di glicoli e polietilenglicoli, e molecole più piccole come l'acido succinico, anch'esso utilizzabile in poliesteri. Una produzione in larga scala di acido succinico bioderivato è per esempio ora effettuata dalla Reverdia di Cassano Spinola.

CI sono stati sviluppi molto importanti riguardo un materiale che è, in un certo senso, sia nuovo che vecchio, l'olio di soia ed i suoi componenti acidi grassi. Questi sono stati, naturalmente, usati nella produzione di resine alchidiche dagli inizi di questa tecnologia, formando la base delle alchidiche siccative prodotte e commercializzate in Nord America, sia all'acqua che a solvente. Grazie a ricerche finanziate dai produttori americani di soia (lo United Soyben Board; sommario a https://soynewuses.org), l'olio e gli acidi grassi insaturi e variamente epossidati e derivatizzati sono stati trasformati in una varietà di intermedi e prodotti. Un uso consolidato è quello come solvente di pulizia chimica del metil soiato, che ora è messo sul mercato sia da produttori regionali come Soy Technologies che da giganti globali come la BASF. Più recentemente sono diventate largamente disponibili delle resine per vernici epossidiche, resine idrossilate per poliuretani bicomponenti, materie prime per poliesteri and prepolimeri poliuretanici ecc. Infine, nel corso dell'ultimo anno

sono diventati disponibili componenti insaturi per prodotti a reticolazione radiativa e con perossidi, rendendo così possibile formulare prodotti per queste tecnologie di reticolazione con percentuali molto alte di contenuto bio-derivato. La IVM Chemicals sta ora campionando a clienti prodotti di questo tipo con contenuto bio-derivato tra circa 30% e quasi 100%, quando calcolato sulla base del numero di atomi di carbonio da tali fonti.
Ci sono già risultati molto interessanti anche nel campo dei solventi bio-derivati. Ci sono già numerose proposte commerciali, come i prodotti della Vertec americana che sono descritti come derivanti da granturco, soia, agrumi e altre fonti rinnovabili, e come sostituti pratici di prodotti petrolchimici pur avendo composizione completamente diversa. La nostra esperienza è che questi solventi sono simili a quelli petrolchimici corrispondenti in velocità d'evaporazione, ma non per potere solvente. Ci sono anche proposte commerciali, per esempio Augeo della Solvay, che sono nuovi solventi (o meglio coalescenti per sistemi all'acqua) da fonti bio-rinnovabili con prestazioni migliorative rispetto ad analoghi petrolchimici. La ricerca in questo campo resta molto attiva e fruttifera, ivi compresi vasti progetti di ricerca con finanziamento europeo come EcoBioFor (http://ecobiofor.eu) finito nel 2017, e Pulp2Value (http://pulp2value.eu) che invece dovrebbe concludersi nel 2019. Questi progetti hanno individuato processi di sintesi che ottengono esatti corrispondenti (stesse molecole) di solventi petrolchimici come acetato d'etile e di butile o butil glicole, per cui, quando i loro risultati verranno commercializzati, sono senz'altro di grande interesse per l'industria delle vernici. Infatti, il consorzio di ricerca Biorizon (https://www.biorizon.eu/) dedicato alla sintesi di solventi aromatici da fonti bio-rinnovabili vede la partecipazione di partner industriali con forte interesse nelle pitture e vernici come Covestro, DSM, Worlee ed Hexion.

Come nel caso dei solventi, sembra che il modo più veloce per ottenere componenti da fonti bio-rinnovabili sia che tali componenti siano esatte copie di, o quanto più simili a, quelle attuali. Questa è stata senz'altro la scelta della Covestro quando ha sviluppato i corrispondenti esatti da fonti biorinnovabili degli isocianurati derivati da esametil di-isocianato, cioè dei poli-isocianati più utilizzati nelle vernici e pitture poliuretaniche bicomponenti, sia a solvente che all'acqua. Questi prodotti sono ora usati da numerosi fabbricanti di vernici che hanno lanciato delle serie di prodotti poliuretanici bicomponenti la cui proposta di vendita è esplicitamente quella di avere una maggiore percentuale di origine da fonti bio-rinnovabili rispetto a vernici tradizionali equivalenti. Mentre in alcuni casi l'unico aumento di origine da fonti bio-rinnovabili è appunto l'uso degli isocianurati bio della Covestro, la serie di prodotti della IVM Chemicals aggiunge a questo l'uso, come resina principale, di alchidiche ossidrilate con altissimo contenuto bio-rinnovabile.
Data l'enorme importanza dell'acido acrilico come materiale di base per la produzione di leganti, non è sorprendente che ci sia stato uno sforzo organizzato al massimo livello per trovare delle vie sintetiche commercialmente utilizzabili per sintetizzarlo da fonti bio-rinnovabili. BASF, Cargill e Novozymes hanno infatti messo insieme nel 2012 un progetto comune di ricerca e innovazione. Malgrado si siano raggiunti dei buoni risultati scientifici e si siano anche fatti progressi per la loro industrializzazione, la BASF deve avere perso fede nel loro valore economico perchè è uscita dal consorzio nel 2015. Ciononostante, altre aziende, come la Evonik o la Sartomer/Arkema, ora offrono delle serie di monomeri ed oligomeri acrilici e metacrilici (sotto i nomi, rispettivamente,

di Visomer e SarBio) direttamente utilizzabili in vernici o come intermedi per ulteriore sintesi di resine, con varie percentuali di origine certificata da fonti bio-rinnovabili. Altri produttori, come la Allnex, si sono concentrati sulle resine acriliche insature, dove il backbone poliestere, polietere o poliuretanico può essere più facilmente derivato in parte da fonti bio-rinnovabili.

Ma, per tornare a quanto detto inizialmente circa la grande promessa dei materiali bio-rinnovabili come possibile fonte di nuovi e superiori componenti per le nostre applicazioni, c'è ora moltissimo lavoro di ricerca ed innovazione anche su questo lato, specie più recentemente. Un esempio già arrivato alla industrializzazione se non alla commercializzazione è quello dell'alpha-1,3-glucan, un agente opacante completamente bio-rinnovabile, il cui lancio è stato annunciato da DuPont. Si tratta di un polisaccaride di 800 unità con un indice di polidispersità (PDI) minore di 2, qualcosa molto difficile da ottenere partendo da materiali convenzionali. È uno sviluppo su larga scala di qualcosa inizialmente sviluppato come una specialità di alto costo per la cosmetica.

Simili sviluppi sono stati portati avanti da Corbion Purac a partire dall'acido lattico e da Hexion a partire dall'acido versatico. Dato che in questi casi si ottengono leganti con proprietà diverse da quelle dei leganti convenzionali, e che questa differenza è fondamentale nella formulazione di prodotti vernicianti molto più di quanto non lo sia una differenza in un agente opacante, per potere avere successo commerciale le aziende coinvolte hanno capito che devono fornire non solo la materia prima, ma anche assistenza formulativa, selezione delle altre componenti più adatte, e solide ricette di partenza. In questi casi, quindi, le aziende produttrici di intermedi devono fornirsi di un laboratorio di ricerca sulle vernici che vada ben oltre quello che serve a chi sviluppa solo materiali convenzionalmente petrolchimici.

Tra le materie prime bio-rinnovabili con le maggiori promesse sembrano al momento svettare quelle con multipli gruppi reattivi, in accordo con l'ipotesi che è proprio la ricchezza di gruppi reattivi a dare un vantaggio ai materiali bio-rinnovabili rispetto a quelli da fonti petrolchimiche. Un esempio è il sorbitolo, con sei idrossidi di cui due primari e quattro secondari, ed il problema principale è proprio la varietà di prodotti che possono ottenersi da diversi schemi di reazione di questi gruppi reattivi. Molti gruppi sono al lavoro: per esempio, tecniche enzimatiche sono state sviluppate all'università di Eindhoven per la produzione di oligomeri per reazione diretta con diacidi, e si è dimostrato che tali oligomeri formano un film di vernice dalle proprietà promettenti quando fatti reagire con un poliisocianato. Un secondo esempio è quello della lignina. Questo è un materiale molto complesso, poliaromatico con multipli gruppi reattivi, che è disponibile in grande quantità come sottoprodotto dell'industria della carta. È già stato mostrato che può essere usato direttamente come resina o trasformato in vari modi, quando adeguatamente purificato e separato in frazioni secondo il peso molecolare. Un'intensa attività di ricerca, ancora per lo più a livello accademico, sta rivelando molti nuovi aspetti della chimica di questo insieme di polimeri. Data la tendenza ad essere colorato, potrebbe trovare utilizzo prima in elastomeri che in vernici.

Un ulteriore esempio è quello dell'acido itaconico, un diacido con un doppio legame simile ad un doppio legame acrilico ma perpendicolare alla linea di congiunzione dei carbossili. Anche in questo caso, molti gruppi sia in ambiente accademico che di ricerca industriale, stanno lavorando per produrre resine in cui si possano variamente sfruttare questi tre gruppi reattivi. Per esempio, è appena partito il progetto europeo LIFE-Biopaint, finanziato dal direttorato ambiente dell'EU, con

la partecipazione della IVM Chemicals come partner guida. Il progetto si pone come scopo lo sfruttamento dell'acido itaconico con integrazione verticale: comprende la produzione di poliesteri insaturi che lo contengano, da ottimizzare, nell'esistente impianto di produzione resine della IVM; la produzione di vernici in un reparto appositamente sviluppato di cui si dovrebbe costruire il pilota nel corso del progetto; e l'uso di tali vernici in processi di verniciatura il meno ambientalmente impattanti possibile, cioè quelli a reticolazione radicalica, UV o con l'uso di perossidi. L'uso di energia, l'emissione di composti organici volatili e la produzione di scarti verrebbe minimizzata in tutti gli stadi della catena produttiva, in aggiunta all'alto contenuto di materiale da fonti bio-rinnovabili previsto per le vernici del progetto.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE PER LO SVILUPPO

È evidente dalla descrizione dello stato dell'arte che sviluppi ulteriori in questo settore richiedono risorse considerevoli, e una decisa concentrazione di risorse o da industrie che abbiano una integrazione verticale su almeno un paio degli scalini della scala di valore o da strette cooperazioni tra aziende che possano rappresentarle, con supporto significativo per know-how aggiunto di collaboratori accademici o di centri di ricerca. Il supporto degli enti finanziatori europei di ricerca ed innovazione è anch'esso fondamentale, specie per accellerare tali sviluppi in Italia.

Pertanto, è positivo vedere che tali enti prestano molta attenzione a queste possibilità. Il programma europeo di azione ambientale 1386/2013/EU, la roadmap per un uso efficiente delle risorse in Europa, COM (2011) 571, e le linee guida per una economia circolare, COM (2014) 398 tutte sottolineano l'importanza dell'uso di fonti bio-rinnovabili in una varietà di settori industriali tra cui quello delle vernici e pitture.

POTENZIALE RICADUTA OCCUPAZIONALE

Il mercato delle pitture e vernici è, in Italia come in Europa, un mercato maturo con bassi tassi di crescita. Non è, però, un mercato in calo o particolarmente sotto pressioni competitive da parte di paesi con minori costi del lavoro. Quanto ai vincoli regolarìtori, nuove restrizioni sui composti organici volatili in Cina, fatte per diminuire i severi problemi di smog chimico nelle grandi città e grandi aree industriali di quel paese, sono andate anche oltre quanto richiesto in EU o USA e stanno contribuendo a far muovere la domanda cinese di vernici verso le tecnologie vernicianti più avanzate dal punto di vista dell'impatto ambientale. Pertanto, il flusso commerciale di pitture e vernici è dall'Europa, ed in particolare dall'Italia, verso paesi extraeuropei.

La pressione competitiva, pertanto, è perlopiù tecnologica: questo è un settore in cui innovare è assolutamente necessario per potere espandersi o anche solo mantenere le posizioni acquisite. Lo sviluppo di prodotti a basso impatto ambientale, come abbiamo detto, sembra garantire un valore aggiunto extra e pertanto maggiori opportunità commerciali.

Specialmente nel settore delle vernici per legno la capacità di fornire vernici e pitture bio-rinnovabili sembra sul punto di diventare una necessità. Forse per il substrato anch'esso bio-rinnovabile, o per le destinazioni d'uso domestiche o commerciali come mobili o pavimentazioni, la preferenza del consumatore finale per un sistema eco-sostenibile comincia a farsi sentire attraverso la catena produttiva.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 5

VALORIZZAZIONE DELLE BIOMASSE E LORO RIUTILIZZO

Con il termine di biomasse si indicano una serie di materiali di origine biologica. Spesso si tratta di scarti agricoli, ma non solo. Generalmente le grandi quantità di biomassa vengono usate per produzione di energia, ma la loro natura di fonti rinnovabili le rende utilizzabili per applicazioni alternative che ne permettano anche il riutilizzo, nel rispetto delle strategie di economia circolare. Il riutilizzo di biomasse è stato negli ultimi decenni diretto anche a una tipologia più vasta di masse di scarto di lavorazioni industriali, spesso anche di origine animale. Tra queste basti pensare ai residui della lavorazione del cuoio, nei confronti dei quali si è consolidato da tempo un processo chimico che ne permette l'idrolisi delle strutture proteiche del cuoio ottenendo un prodotto ricco in amminoacidi liberi, con applicazioni agronomiche.

A processi chimici di questo tipo da diversi anni si sono sviluppati processi alternativi, o almeno i mercati e l'attenzione all'impatto ambientale e alla bioeconomia richiedono processi innovativi per il trattamento delle biomasse e dei residui di lavorazione. Il futuro già nel breve periodo si orienterà verso processi più selettivi ed eco-compatibili e questa innovazione è già iniziata. I processi chimici che generano idrolizzati riutilizzabili hanno un impatto rilevante in termini ambientali e di sicurezza, basandoci su trattamenti aggressivi, ad esempio utilizzando acido cloridrico concentrato a elevata temperatura. L'attenzione verso processi più ecocompatibili, senza penalizzare l'efficacia del processo, sta portando allo sviluppo di applicazioni basate sull'utilizzo di enzimi, biomolecole di natura proteica con proprietà catalitiche in grado di accelerare enormemente una reazione, in condizioni non estreme.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Come poco sopra riportato, l'uso delle biomasse si è focalizzato su uno sfruttamento energetico o trattamenti chimici semplici, per idrolizzare le macromolecole contenute nelle biomasse, ma in condizioni relativamente drastiche e pericolose. Il trattamento con acido cloridrico concentrato e caldo permette l'idrolisi delle proteine nei suoi componenti primari, gli amminoacidi. Oltre alle condizioni pesanti da gestire, il trattamento provoca inconvenienti anche sul prodotto finale, dove alcuni amminoacidi vengono danneggiati o generati con configurazione indesiderata.

La crescente attenzione verso processi più efficaci ma con ridotto impatto ambientale, l'uso di biomasse rinnovabili di origine vegetale preferibili a quelle animali, il consolidamento della bioeconomia e del suo impatto hanno portato allo sviluppo di processi alternativi, basati sull'utilizzo di biocatalizzatori (enzimi) specifici per le varie componenti polimeriche contenute nelle diverse biomasse. L'utilizzo degli enzimi rivoluziona la valorizzazione delle biomasse, grazie a importanti caratteristiche da loro possedute:

- una elevata selettività

- ampia scelta di enzimi per le varie categorie di molecole polimeriche contenute nelle biomasse
- uso di condizioni di reazione blande
- quantità modeste di enzimi necessarie per l'idrolisi delle biomasse
- pericolosità trascurabile rispetto agli agenti chimici come l'acido cloridrico.

Oltre all'uso di enzimi, anche nei riguardi delle biomasse vi è l'interesse crescente verso quelle realmente rinnovabili, quindi di origine vegetale e con la necessità di essere valorizzate e riutilizzate. Proprio l'uso degli enzimi ha aumentato le possibilità di utilizzo, andando a soddisfare richieste o aprire opportunità in vari settori. Commercialmente la disponibilità di enzimi si è consolidata e ampliata, supportando le potenzialità di sviluppo di trattamento delle biomasse. La motivazione di direzionarsi verso questa tecnologia, abbandonando velocemente la chimica classica basata su agenti chimici aggressivi, è proprio legata alla necessità di avere processi a basso impatto e che possano il più possibile integrarsi in una economia circolare. Chimica tradizionale e biotecnologia possono efficientemente agire in sinergia o alternarsi in base ai vantaggi che possono scaturire da soluzioni alternative, come l'uso di enzimi.
L'impatto ambientale e l'uso razionale delle risorse è una ulteriore motivazione che ha spinto l'innovazione, la volontà di trovare nuove soluzioni che, senza minare efficacia del processo e con costi sopportabili, tengano conto della necessità di gestire in maniera oculata le risorse disponibili, che possa essere consolidata in processi veramente proiettati nel terzo millennio.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Abbiamo accennato alla versatilità dell'approccio enzimatico nel trattamento delle biomasse, e questa è una delle ulteriori chiavi di successo. Uno di particolare interesse è l'idrolisi delle biomasse per il loro utilizzo nelle applicazioni agronomiche come biostimolanti e non solo come semplici fertilizzanti. Ricordiamo che i biostimolanti sono prodotti che, applicati alla pianta o alla rizosfera in quantità modesta, stimolano i processi naturali che migliorano l'efficienza di assorbimento/assimilazione dei nutrienti e la tolleranza a stress abiotici. I biostimolanti non hanno effetti diretti su parassiti e patogeni e quindi non rientrano nella categoria dei pesticidi. I biostimolanti sono una importante categoria commerciale che, nel passaggio da processi chimici con agenti aggressivi (come l'acido cloridrico) a processi biochimici ha trovato un rilancio esponenziale. Ciò è testimoniato dall'interesse crescente di società del settore, sia nazionali che internazionali, spesso di grandi dimensioni, e dalla diffusione mondiale di congressi, fiere e manifestazioni inerenti i biostimolanti (ad esempio ABIM è una manifestazione che si tiene annualmente in Svizzera, a Basilea, di dimensioni contenute ma estremamente vivace e focalizzata sui biostimolanti). Un connubio tra chimica/biochimica e agricoltura che testimonia la possibilità concreta di generare innovazione nel rispetto di ambiente e sicurezza.
La tecnologia comporta il trattamento delle biomasse vegetali, quindi spesso rappresentate da scarti o sottoprodotti delle lavorazioni agricole, con miscele calibrate di enzimi in grado di idrolizzare e frammentare le trame polimeriche contenute nella materia prima vegetale, rappresentate, a seconda dei casi specifici, da cellulose, emicellulose, proteine, pectine e altro (Figura 1). Il ma-

teriale, se inumidito o risospeso in soluzione acquosa, diventa gradualmente, e velocemente, più disperso e meno viscoso, rilasciando le molecole idrolizzate nel mezzo. Questo prodotto finale, opportunamente testato sulle colture con protocolli consolidati (Figura 2), può evidenziare effetti biostimolanti, incrementando le difese intrinseche della pianta, con riscontri di crescite maggiori, aumento dei frutti, ecc. Ciò che viene dalla natura viene quindi restituito in forma disponibile, in pratica accelerando ciò che può accadere ad esempio in un bosco, dove foglie, rami e altre biomasse vengono lentamente processate dalla popolazione microbica del terreno. Nello sviluppo dei biostimolanti non facciamo altro che accelerare questo processo.

A livello nazionale, europeo e mondiale l'interesse sta aumentando progressivamente in quanto è in discussione e in elaborazione una nuova regolamentazione ad hoc per settore biostimolanti, che al momento si muove ancora in una sorta di "terra di mezzo" non ancora paragonabile a quanto regolamenta il settore fertilizzanti e, sensibilmente di più, gli agrofarmaci.



FIGURA 1 – TRATTAMENTO ENZIMATICO DELLE BIOMASSE A DARE COMPOSTI CON EFFETTO BIOSTIMOLANTE

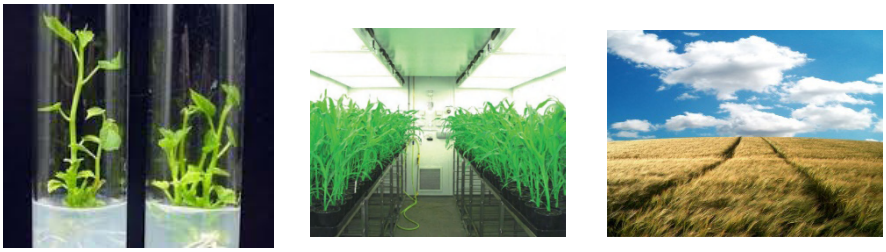


FIGURA 2 – BIOSTIMOLANTI: PROTOCOLLI DI SPERIMENTAZIONE CHE PARTONO IN VITRO PER ARRIVARE ALLE SERRE E AL PIENO CAMPO

Questa evoluzione in corso porrà dei limiti e delle regole ma andrà nella direzione che permetterà:

- lo sviluppo di nuovi biostimolanti
- il consolidamento di prodotti veramente efficaci, eliminando proposte aleatorie e approssimative senza basi tecniche solide e documentate
- regole condivise e presenza sul mercato di prodotti controllati ed efficaci.

Le ricadute saranno positive su diversi livelli, sia locale sia a livello transnazionale e mondiale. Infatti, biomasse prodotte da realtà agricole o altre, potranno essere trattate in maniera localizzata a livello territoriale, favorendo il connubio tra realtà differenti e creando una rete di riutilizzo che permetta di evitare trasporti onerosi di biomasse a basso costo.
Le biomasse subirebbero una sensibile diminuzione e un eventuale residuo potrebbe comunque seguire il destino, ad esempio, energetico (impianti biogas o altro). Nella logica di non movimentare per lunghi tragitti le biomasse, la produzione di biostimolanti potrebbe diventare una occasione per realtà distribuite nel mondo, anche con profili di sviluppo sostenibile per paesi poveri o emergenti. Basti ricordare che alcune biomasse di interesse derivano da processi basati su colture tropicali, quindi diventerebbero una opportunità per sviluppare iniziative di sviluppo e produttive direttamente nei paesi di origine, con un connubio tecnico-commerciale tra paesi industrializzati e paesi in sviluppo virtuoso (non si movimentano le materie prime, ma il prodotto finito).
Il mercato dei biostimolanti è in fermento e con prospettive importanti: basti considerare che le recenti stime prevedono un mercato mondiale che sfiorerà i 3,2 miliardi di dollari entro i prossimi 4 anni. Per fare un confronto, questa previsione rappresenta quasi il doppio del fatturato mondiale del 2016. Quindi, il settore dei biostimolanti mostra tassi di crescita estremamente elevati. Non è perciò un caso che nel comparto dei biostimolanti siano particolarmente attivi i fondi d'investimento, che in genere sono abituati a lavorare con percentuali annue di crescita a due cifre.
L'uso di enzimi ha applicazioni aggiuntive di interesse industriale, ricollegandoci alla capacità degli enzimi di catalizzare l'idrolisi selettiva di polimeri naturali. Questi ultimi, nella struttura delle biomasse, ha un effetto meccanico e non solo, trattenendo spesso anche molta acqua e conseguentemente molte molecole di interesse nella trama polimerica. Questo effetto è abbastanza evidente se si pensa ai frutti colorati (mirtilli, uva, ecc.), dove i composti benefici e con proprietà antiossidanti non vengono efficacemente rilasciati, specialmente dalle bucce, solamente con un'azione meccanica. La capacità degli enzimi di degradare le trame polimeriche agevola in maniera consistente il rilascio di acqua e dei componenti colorati con proprietà benefiche e antiossidanti, proprio grazie alla rimozione dell'effetto di trattenimento da parte dei polimeri, smantellandone l'integrità.
Questo vantaggio, conosciuto e applicato ad esempio nei processi industriali di produzione dei succhi di frutta (riduzione della ritenzione da parte della pectina), è stato applicato anche in altri processi che presentano problematiche simili, e tale approccio è in espansione. L'idrolisi dei polimeri vegetali può agevolare il rilascio di componenti della biomassa di interesse, in vari settori applicativi. Infatti, le biomasse vegetali sono fonte di un'ampia varietà di metaboliti secondari, che rimangono spesso trattenuti tenacemente dalla struttura polimerica. L'azione degli enzimi rappresenta anche in questo caso una valida alternativa per aumentare le rese di estrazione. Spesso,

la trama viene indebolita e l'estrazione, con soluzioni acquose o con solventi organici a seconda dell'applicazione e delle caratteristiche chimico-fisiche delle molecole di interesse, permette un recupero efficace. Questa modalità trova applicazione nell'estrazione di composti di interesse nel campo cosmetico, nutraceutico e farmaceutico.
Abbiamo accennato all'utilizzo energetico delle biomasse, e anche in questo caso gli enzimi hanno applicazione e prospettive. L'aspetto energetico ha una importanza ormai internazionale, con delle realtà consolidate anche in aree nazionali, ad esempio i numerosi insediamenti di impianti di produzione di biogas, in particolare nel nord Italia. Il trattamento preventivo delle biomasse destinate agli impianti di biogas è già una realtà, in quanto agevola la disponibilità di molecole più semplici (originate dall'idrolisi enzimatica dei polimeri complessi) per le colture microbiche produttrici di biogas, con conseguente incremento della produzione di energia nel tempo. Un approccio simile, di aumento della biodisponibilità delle biomasse, ha applicazioni e prospettive anche nella produzione di altri prodotti di utilizzo energetico, quali ad esempio l'etanolo ottenuto mediante fermentazioni di lieviti.
La digestione anaerobica, ovvero il tipo di fermentazione su cui si basa la produzione di biogas, avrà una nuova frontiera di sviluppo nel continuo miglioramento del trattamento delle biomasse, con miscele enzimatiche calibrate e dedicate a migliorare le performance di ogni specifica categoria di biomassa utilizzata.
Possiamo quindi affermare che il trattamento delle biomasse ha un futuro di espansione e di evoluzione, partendo da una chimica tradizionale, con agenti chimici aggressivi, a un approccio più "soft" ed ecocompatibile, con l'affiancamento di tecnologie biochimiche per innovare l'idrolisi delle strutture polimeriche di natura chimica eterogenea. Gli impianti a biogas rappresentano una opportunità in quanto gli enzimi migliorano la redditività delle biomasse impiegate, ma ciò diventa anche un primo passo per sviluppare anche il settore, nella direzione di bioraffinerie che incrementino la redditività totale. Nell'ambito enzimatico, ricordiamo che lo stesso digestore, ovvero il reattore dove avviene il processo anaerobico cuore dell'impianto, potrebbe diventare una fonte di enzimi utilizzabili, prodotti dalla popolazione microbica presente all'interno del digestore.

Obiettivi strategici

La grande opportunità che si presenta, a livello nazionale, è lo sviluppo di tecnologie, innovative, efficaci e compatibili con l'ambiente in un settore decisamente in sviluppo e che può seriamente rilanciare il settore agricolo e non solo, con realtà diffuse a livello territoriale. Nel caso dei biostimolanti, l'opportunità è legata anche al momento particolare, in cui si è in attesa di una nuova normativa, e investire per diventare protagonisti con soluzioni nuove ed efficaci permetterebbe di essere in prima linea una volta che il settore biostimolanti assumerà una propria configurazione normativa. Va sottolineato anche il fatto che il trattamento di biomasse con approcci biotecnologici e i prodotti derivati hanno una fortissima attinenza con il tema di sviluppo dell'economia circolare, in quanto si configurano come tecnologie in grado di valorizzare sottoprodotti dell'industria agricola allo scopo di reimmetterli nel sistema, con una funzione di stimolante naturale delle colture, un duplice vantaggio in termini di benessere della coltivazione e, più in generale, del sistema agro-alimentare.

Possibili ricadute occupazionali

Gli approcci enzimatici per il trattamento delle biomasse permettono, grazie alla selettività e alla varietà degli enzimi disponibili, di trattare un'ampia varietà di materiale di partenza e questa è una opportunità, che agevola il rilancio multidirezionale verso biostimolanti o incremento dell'efficienza o del rendimento di processi di estrazione o bioenergetici. La sequenza virtuosa partirebbe quindi dalle biomasse prodotte in maniera diffusa, il loro riutilizzo, il rilancio di un settore o meglio di più settori con un conseguente rilancio occupazionale. Questo è ciò di cui ha bisogno il paese: tecnologie nuove, applicabili e in grado di rilanciare l'economia reale. Oltre al rilancio del nuovo, va ricordata anche la possibilità di ottimizzare ciò che già è presente. Un esempio è il comparto di produzione di biogas, che ha avuto una veloce diffusione grazie anche agli incentivi nazionali concessi per l'installazione di nuovi impianti e per la loro gestione.

Se questi incentivi economici subiranno una flessione o addirittura si andrà gradualmente verso una loro eliminazione, se non penseremo a strategie nuove che portino allo sviluppo di vere e proprie bioraffinerie, potremmo avere dei seri problemi di sostenibilità del settore.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 6

SINTESI DI ETIL DIAZOACETATO IN FLUSSO

L'etil diazoacetato è un composto particolarmente versatile per successive reazioni chimiche, dovuto alla sua alta reattività. Tra le reazioni che utilizzano tale intermedio, possiamo ricordare la ciclopropanazione, la reazione di inserimento di un carbene in un legame carbonio idrogeno, la cicloaddizione e la formazione di ilidi e più recentemente la sintesi di composti appartenenti alla classe dei b-chetoesteri. Tuttavia, a causa della sua natura altamente esplosiva, la sua produzione è severamente limitata nei processi industriali. Con l'avvento dei processi in continuo, sono stati sviluppati nuovi approcci al problema della sintesi dei diazoacetati derivati che hanno permesso un cambiamento concettuale su come condurre un processo chimico che generi questa famiglia di composti.

DESCRIZIONE

L'etil diazoacetato può esser sintetizzato in flusso con un procedimento cioè in continuo, in cui il punto chiave è rappresentato dalla generazione del prodotto in un sistema (microreattore) che successivamente può reagire con altri sistemi in modo che esso venga a rappresentare come una specie transiente e, quindi, limitata nella quantità e nei tempi.

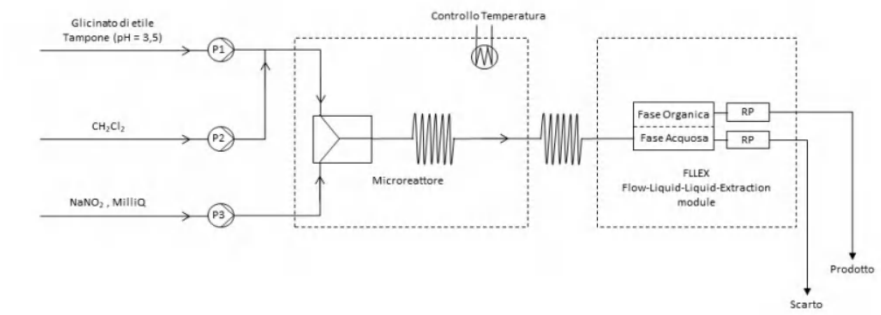
L'etil diazoacetato è usualmente sintetizzato da glicina etil estere e sodio nitrito in presenza di un pH acido.

La reazione è molto sensibile alla temperatura ed è fortemente esotermica. Per tale motivo la reazione deve esser raffreddata e l'etil diazoacetato, una volta formato,deve esser velocemente estratto in quanto inizia velocemente a decomporsi in ambiente acido.

La reazione di condensazione e di estrazione è condotta di continuo utilizzando un microreattore che forma il prodotto suddiviso in microgocce di prodotto nel solvente organico appropriato disperso in acqua. I microreattori che permettono questa formazione sono risultati i più idonei per la loro veloce dissipazione del calore e per la miscelazione per convezione che avviene dentro le goccioline. Inoltre tali microreattori permettono una grande area superficiale per unità di volume che permettono una efficiente estarione dell'etil diazoacetato dalla miscela acida di reazione minimizzando così la decomposizione stessa del prodotto che si forma.

A questo microreattore si affianca un microseparatore di fase, usualmente a film idrofobico polimerico, che permette la separazione rapida della fase acquosa dalla fase organica indicato nello schema qui sotto come FLLEX o separatore di estrazione a flusso liquido-liquido. Due regolatori di pressione (RP) permettono di creare una differenza di pressione che fa sì che la fase organica passi attraverso la membrana dando luogo alla separazione di fase. L'etil diazoacetato può cosi procedere ad un passaggio successivo di reazione con il substrato che si preferisce per la reazione finale. In questo modo, come prima menzionato, l'etildiazoacetato viene a rappresentare come

una specie transiente, senza nessun accumulo e con eliminazione delle problematiche connesse alla esplosività intrinsica del prodotto.
Si porta di seguito lo schema di un microreattore con formazione in contnuo, estrazione, separazione e possibile ulteriore reazione dell'etil diazoacetato con il substrato che interessa.



CONCLUSIONI

Il sistema in flusso integrato con un separatore a membrana permette di sintetizzare etil diazoacetato di continuo e farlo successivamente reagire con l'adatto substrato eliminando l'eventuale accumulo di prodotto e il pericolo di esplosività connessi. La formazione e la separazione dell'etil diazoacetato sono altamente efficienti con accumulo di prodooti pericolosi particamente inesistente. Questo sistema a flusso non solo permette una manipolazione più sicura ed efficiente dell'etil diazoacetato tossico ed esplosivo, ma permette anche la produzione sicura ed efficace di prodotti che prevedono l'uso di etil diazoacetato.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 7

ADDITIVE MANUFACTURING E SVILUPPO DI MATERIALI

La cosiddetta Additive Manufacturing (a volte indicata come prototipazione rapida o stampa 3D) è un metodo di fabbricazione dove strati di un materiale vengono aggiunti per creare un oggetto solido. Produrre un modello digitale è il primo passo nel processo di produzione additiva. Il metodo più comune per la produzione di un modello digitale è il cosiddetto computer-aided design (CAD). La fase successiva consiste nel convertire il modello CAD in un file STL (o file di stereolitografia). Una volta che un file STL è stato generato il file viene importato in un "slicer program". Questo programma prende il file STL e lo converte in G-code, un linguaggio di programmazione di controllo numerico (NC) che ha il compito di istruire la stampante che è quindi pronta a ricevere il materiale e applicarlo per costruire l'oggetto tridimensionale.

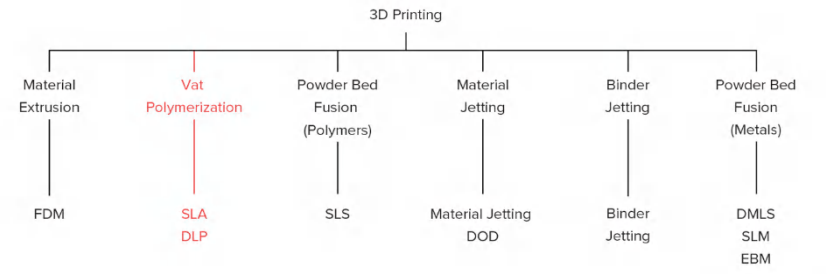
MOTIVAZIONI STRATEGICHE PER LO SVILUPPO

La stampa 3D sta portando ad una rivoluzione dell'industria manifatturiera: nel prossimo futuro si assisterà ad il passaggio da un modello centralizzato e fortemente localizzato ad un'industria "diffusa" dove potenzialmente ogni cittadino potrà diventare "produttore di beni". La stampa 3D consente infatti la fabbricazione diretta di manufatti tridimensionali, precedentemente digitalizzati attraverso specifici software di modellazione. Nel corso degli ultimi tre decenni, sono state sviluppate una grande varietà di tecnologie di stampa 3D, che consentono di trasformare un "idea" in un prototipo. Data l'estrema adattabilità e il rapido sviluppo di questa tecnologia, si potrà assistere nel breve periodo ad una rivoluzione trasversale in tutti i settori, dal manifatturiero al design, dai servizi alle nuove tecnologie. Una delle sfide sarà quella di rendere facile il passaggio da una funzione prototipale di questa tecnologia ad una più meramente produttiva. La AM richiede inoltre lo sviluppo di nuovi materiali che rispondano a esigenze differenziate: sostenibilità ambientale, possibilità di riciclo, alta rigidità e resistenza meccanica, conducibilità elettrica e termica, specifiche proprietà funzionali. Contrariamente a quanto avviene per le tecnologie ed i materiali tradizionali, si produrrà una stretta relazione tra sviluppo di nuovi materiali e sviluppo di nuovi prodotti. Sarà infine necessario controllare e migliorare le proprietà di morfologia e resistenza termo-meccanica dei materiali processati. La stampa 3D offre evidenti vantaggi in campo medicale, soprattutto per quanto riguarda i dispositivi biomedici e l'ingegneria tissutale. La sua peculiare abilità di produrre pezzi singoli su misura o in pochi esemplari sulla base dei bisogni specifici del medico o del paziente, unita alla possibilità di variare il prodotto da paziente a paziente senza costi addizionali, rende questa tecnologia molto promettente per questo ambito. Nonostante le grosse potenzialità, molti sono ancora i problemi irrisolti riguardanti gli aspetti regolatori, la produzione in ambiente sterile e la necessità di realizzare materiali capaci di conservare proprietà fisiche e chimiche volute anche dopo il processo di stampaggio. Fra le

più importanti innovazioni ad oggi proposte si possono citare lo sviluppo di stampanti in grado di utilizzare cellule e proteine (bioprinters), la realizzazione di scaffold, i nanocompositi ceramici e polimerici per il campo dentale, sviluppo di materiali per la stampa 3D nel campo delle medical devices. Nell'ambito della meccanica fine, lo sviluppo di nanopolveri metalliche potrà supportare la produzione di componenti con elevate precisioni dimensionali e caratteristiche meccaniche superiori. Nell'ambito dell'elettronica si possono prevedere importanti sviluppi nella costruzione parti e componenti "flessibili" basati su stampa multilayer di circuiti completi con materiali innovativi (grafene, nanoargento, etc.). La stampa 3D recentemente è stata anche impiegata a scopi dimostrativi nel campo dell'edilizia, in particolare nel utilizzo di impasti cementizi. In questa ottica, lo sviluppo di impasti innovativi con proprietà chimiche e reologiche opportunamente controllabili rappresenta un passaggio essenziale.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Attualmente esiste un grande numero di tecnologie e materiali per la stampa 3D ed ognuna di esse porta a prodotti che differiscono nella precisione dimensionale, finitura superficiale e requisiti di post-elaborazione. Cercheremo qui di categorizzare e riassumere le differenze tra ognuna delle tecnologie di fabbricazione additiva.



1) Si ha fotopolimerizzazione quando una resina fotopolimerica è esposta alla luce di una specifica lunghezza d'onda e solidifica. Nella stereolitografia (SLA) viene creato un oggetto per mezzo di un "curing layer by layer" mediante laser UV di polimeri termoindurenti fotosensibili in forma liquida. Nella tecnologia "Direct Light Processing" (DLP), invece del laser, si proietta per mezzo di uno schermo digitale una singola immagine per ogni layer. La "Continuous Direct Light Processing" (CDLP) differisce solo per il movimento continuo nell'asse Z del piatto. I processi di fotopolimerizzazione sono ottimali nella produzione di componenti con dettagli fini e superfici smooth rendendoli ideali nella produzione di gioielli, nella "low-run injection molding" e in molte applicazioni dentali e mediche mentre i maggiori problemi derivano da una intrinseca fragilità delle parti prodotte.

Technology	Common manufacturers	Materials
SLA	Formlabs, 3D Systems, DWS	Standard, tough, flexible, transparent, & castable resins
DLP	B9 Creator, MoonRay	Standard & castable resins
CDLP	Carbon3D, EnvisionTEC	Standard, tough, flexible, transparent, & castable resins

2) Le tecnologie basate sulla "Powder Bed Fusion" (PBF) utilizzano una sorgente termica che induce la fusione (sinterizzazione o fusione) layer by layer tra nano-micro polveri di metalli di ceramici o di polimeri. La maggior parte delle tecnologie di PBF impiegano meccanismi per applicare sottili strati di polvere uno sopra all'altro in modo tale che il componente finale risulta immerso nella povere eccedente che viene quindi rimossa. Le principali varianti provengono dalle diverse fonti di energia (per esempio laser o fasci di elettroni) e dalle polveri usate nel processo (plastica, metalli e recentemente ceramici). Tra le PBF, La "Selective Laser Sintering" (SLS) produce parti solide (generalmente di materiali plastici) per mezzo di un laser che sinterizza strati di polveri uno alla volta. Il processo inizia applicando uno strato iniziale sopra una piattaforma; la sezione della parte è sinterizzata dal laser e quindi solidificata; la piattaforma si abbassa dello spessore di un strato e nuova polvere è applicata. Il risultato di questo processo è un componente completamente racchiuso nella polvere non sinterizzata. Esso viene rimosso dalla polvere, pulito e quindi è pronto per l'uso o l'ulteriore post-elaborazione. Sia la "Selective Laser Melting" (SLM) e la "Direct Metal Laser Sintering" (DMLS) sono simili alla SLS. La differenza più importante è che queste due applicazioni sono usate nella produzione di parti metalliche. Nella SLM che si usa con singoli metalli come alluminio, si raggiunge la completa fusione della polvere mentre, nell'altra, si ottiene una sinterizzazione ed è quindi usata preferibilmente con leghe metaliche (Ti64 ad esempio). Al contrario della SLS, SLM and DMLS richiedono strutture per compensare le tensioni residue elevate generate durante il processo. Questo per limitare il rischio di deformazione e distorsione. L'EBM, "Electro Beam Melting" usa al posto del laser un fascio elettronico ad alta energia per fondere polveri metalliche; questa tecnica produce minori stress residui rispetto alle precedenti oltre ad essere più veloce, tuttavia la precisione dei dettagli e la finitura superficiale sono peggiori. Oltre a ciò l'applicazione deve essere condotta sotto vuoto e con materiali conduttivi. La "Multi Jet Fusion" (MJF) è essenzialmente una combinazione delle tecnologie SLS e "Material Jetting" MJ (che tratteremo più avanti): un carrello con ugelli inkjet (simili a quelli utilizzati dalle classiche stampanti 2D) deposita un agente fondente su uno strato di polvere polimerica; contemporaneamente un "detailing agent" che serve ad inibire la sinterizzazione è astampato intorno ai bordi della parte da ottenere. Una sorgente IR è quindi applicata allo strato sinterizzando solo quelle aree dove l'agente fondente è stato applicato.

Le tecnologie PBF permettono una grande libertà di design senza bisogno di supporti per la fabbricazione di geometrie complesse. I materiali hanno resistenza e tenacità molto elevate com-

parabili (ed in alcuni casi anche superiori) a quelle dei materiali in bulk. Esistono molti metodi post processo per dare finiture molto precise. Le limitazioni delle tecniche PBF sono incentrate su eventuali rugosità e porosità delle parti stampate e nelle deformazioni che possono avvenire durante la lavorazione.

Technology	Common manufacturers	Materials
SLS	EOS, Stratasys	Nylon, alumide, carbon-fiber filled nylon, PEEK, TPU
SLM/DMLS	EOS, 3D Systems, Sinterit	Aluminum, titanium, stainless steel, nickel alloys, cobalt-chrome
EBM	Arcam	Titanium, cobalt-chrome
MJF	HP	Nylon

3) La "Material Extrusion" è una estrusione di materiale da un ugello che viene poi applicato su una piattaforma; l'ugello segue un determinato percorso che porta ad un assemblaggio 3D layer by layer. La Fused Deposition Modeling (FDM) (conosciuta anche come Fused Filament Fabrication o FFF) è la tecnica 3D più diffusa; essa utilizza fili di materiale termoplastico che è fatto passare attraverso un ugello dove viene fuso. Recentemente sono stati sviluppati materiali compositi con nano/micro cariche o grafene per incrementare le caratteristiche chimico-fisiche dei prodotti. Questa tecnologia è un modo rapido ed economico di produrre prototipi in materiali plastici o compositi. La FDM ha alcune limitazioni di precisione dimensionale ed è molto anisotropa.

Technology	Common manufacturers	Materials
FDM	Stratasys, Ultimaker, MakerBot, Markforged	ABS, PLA, Nylon, PC, fiber-reinforced Nylon, ULTEM, exotic filaments (wood-filled, metal-filled etc)

4) La "Material Jetting" è spesso assimilata alla tecnologia 2D. Si possono utilizzare metalli o polimeri che induriscono o si aggregano quando esposti ad una luce UV o ad elevate temperature formando parti mediante un processo layer by layer. Questa tecnica permette di stampare multi materiali, il materiale (ad esempio un fotopolimero) viene applicato per mezzo di centinaia di sottili ugelli situati su una testa di stampa permettendo la deposizione del materiale in maniera rapida e "linea per linea" piuttosto che per punti come nelle altre tecniche. Al momento che le gocce sono deposte sulla piattaforma esse vengono solidificate per mezzo di luce UV o altre sorgenti. Questa tecnica richiede tuttavia l'uso di supporti che vengono spesso costruiti insieme alla for-

ma con un materiale sacrificale che può essere facilmente rimosso nel post-processing. La "Nano Particle Jetting" (NPJ) usa una sospensione liquida di nanoparticelle, il solvente viene poi evaporato per mezzo di calore. Nella Drop-On-Demand (DOD) i "jetting printers" sono doppi, uno deposita il materiale che serve per la preparazione del pezzo, l'altro applica il materiale sacrificale; la DOD segue un cammino predeterminato costruendo per ogni strato la sezione dell'oggetto finito e del suo supporto che verrà poi rimosso. Questa tecnica è ideale per prototipi realistici, con eccellenti dettagli, elevata accuratezza e finitura superficiale. Si può inoltre stampare con più colori e più materiali. Il principale difetto è rappresentato dal costo elevato e dalla fragilità dei materiali fotopolimerizzati.

Technology	Common manufacturers	Materials
Material jetting	Stratasys (Polyjet), 3D Systems (MultiJet)	Rigid, transparent, multi-color, rubber-like, ABS-like. Multi-material and multi-color printing available
NPJ	Xjet	Stainless steel, ceramics
DOD	Solidscape	Wax

5) La "Binder Jetting" è una tecnica per depositare layer by layer un agente adesivo in uno strato di polveri. I materiali possono essere ceramici (vetro, ossidi metallici, silicati) o metallici (ad esempio acciaio). La testa di stampa si muove sulla piattaforma che è stata ricoperta di uno stato di polvere depositando il liquido adesivo; alla fine della stampa il letto di polvere si abbassa ed un nuovo strato di polvere viene deposto, il processo va avanti fino al completamento del pezzo. Dopo la stampa il materiale stampato si trova in uno stato di "verde" e richiede quindi un post processamento (temperatura). Spesso vengono anche addizionati degli infiltranti (ad esempio cianoacrilati per le ceramiche o bronzo per i metalli) per aumentare le caratteristiche meccaniche dei pezzi. La "Ceramic Based Binder Jetting" è ideale per applicazioni estetiche e formali, non è invece molto adatta per applicazioni funzionali a causa della fragilità dei prodotti stampati. I prodotti metallici possono invece essere utilizzati come componenti funzionali e sono più economici rispetto a quelli prodotti mediante SLM o DMLS anche se hanno minori proprietà meccaniche.

Technology	Common manufacturers	Materials
Binder jetting	3D Systems, Voxeljet	Silica sand, PMMA particle material, gypsum
	ExOne	Stainless steel, ceramics, cobalt-chrome, tungsten-carbide

6) La "Direct Energy Deposition" (DED) crea oggetti per mezzo della fusione di materiale in polvere, generalmente polveri o filamenti metallici. Nella "Laser Engineered Net Shape" (LENS) si utilizza un laser per fondere la polvere che fuoriesce da ugelli il tutto immerso in atmosfera inerte; il laser, in sostanza, crea un hot spot e la polvere è sparata sopra in modo da essere fusa e quindi solidificata. La "Electron Beam Additive Manufacture" (EBAM) viene utilizzata per creare parti metalliche per mezzo di un fascio elettronico invece che un laser; essa è più efficiente della LENS ed opera sotto vuoto. Le tecniche DED sono utilizzate in ambito esclusivamente metallurgico e sono ideali nelle riparazioni o nei micro-nano riporti di materiale su componenti esistenti.

Technology	Common manufacturers	Materials
LENS	Optomec	Titanium, stainless steel, aluminum, copper, tool steel
EBAM	Sciaky Inc	Titanium, stainless steel, aluminum, copper nickel, 4340 steel

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE PER LO SVILUPPO

In accordo con il report della Wohlers associated, i ricavi associati alle AM è stato di 3,07 miliardi di dollari nel 2013 di circa 8,0 nel 2016 ed è prevista essere di 12,0 nel 2018 ed essere superiore ai 21,0 nel 2020. Le attuali tecniche di AM possono essere economicamente convenienti e competere con i processi tradizionali solo per piccoli/medi lotti di produzione di parti metalliche. Oggi si devono affrontare importanti costi di produzione soprattutto relativamente allo sviluppo dei sistemi di stampa e nei materiali, tuttavia questo diminuirà quando le tecnologie AM diventeranno più comuni con costi abbattuti per produzioni di massa, con l'uso di commodities per quanto riguarda i materiali utilizzati e attraverso l'aumento delle capacità di stampa, velocità, dimensioni e automatizzazione. I costi saranno ridotti anche dalla possibilità di un completo ridisegno del prodotto: con l'uso dell'AM, molteplici parti, costituite da più materiali potranno essere sostituite da un assemblaggio integrato che ridurrà sostanzialmente i costi e il tempo, massimizzando la qualità del prodotto. Questo risparmio, derivato dalla riduzione delle materie prime e dei costi di magazzino insieme a catene di approvvigionamento più brevi è stimato tra 113 e 370 miliardi di dollari entro il 2025, (Gebler et al., 2014). Ulteriori vantaggi saranno portati dalla produzione di minori quantità di scarti e rifiuti attraverso una più diretta conversione di materiali in beni e servizi (Gutowski,2009), ottimizzando le geometrie costruttive e creando componenti più leggeri (riduzione del consumo di materia ed energia) con conseguente riduzione dei costi di trasporto (Chen,2015. Mani, 2014).

POTENZIALE RICADUTA OCCUPAZIONALE

Non ci si aspetta che l'AM rimpiazzi i processi convenzionali rendendoli obsoleti tuttavia queste tecnologie si porranno come complementari potendo esprimere le loro caratteristiche uniche in

termini di flessibilità e rapidità. Mentre attualmente la AM viene utilizzata nel campo della prototipazione, si prospettano per il futuro un elevato numero di applicazioni. Si aprono infatti delle opportunità per reti diffuse di fabbriche digitali che potranno rivoluzionare non solo il settore manifatturiero ma anche la "supply chain". Potranno essere create società snelle, focalizzate su piccoli segmenti manifatturieri che lavoreranno con magazzini minimali e materie prime utilizzabili "on demand". Ciò potrà verosimilmente portare ad una economia diffusa di piccole produzioni e di beni personalizzabili, prodotti a prezzi relativamente bassi. Quasi tutti i settori manifatturieri saranno coinvolti in questo processo, in particolare quello medicale, l'aerospazio e quello automobilistico.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 8

PRODUZIONE DI ACIDO ACRILICO E ACRILONITRILE DA BIOMASSE

Nel campo della chimica specialistica, ed in particolare nella farmaceutica, nella detergenza e nella cosmetica, i prodotti ottenuti da biomasse sono già in grandi quantità, mentre nella chimica di base nonostante siano state proposte più di una ventina di molecole piattaforma (gli equivalenti dei mattoni della petrolchimica) per ottenere i primi intermedi ed i polimeri, non c'è praticamente nessuna applicazione industriale per le grandi produzioni. Comunque in questi ultimi 15 anni molteplici sono state le pubblicazioni scientifiche ed i brevetti realizzati sulla sintesi di acido acrilico (bioacrilico)[1] e di acrilonitrile (bioacrilonitrile)[2] da biomasse e numerose sono le molecole piattaforma utilizzate per la loro sintesi. I vantaggi per il futuro di usare le biomasse come materia prima per la produzione di questi due monomeri sono: la possibilità di usare il prefisso bio per la loro caratterizzazione e quella dei loro derivati, la diminuzione delle emissioni di gas serra, la riduzione di rifiuti e sottoprodotti tossici, l'uso di materie prime rinnovabili, l'uso di rifiuti dell'agricoltura e forestali e co-prodotti da bioraffinerie, e offrire un'ulteriore potenziale redditività per l'agricoltura. In particolare per il bioacrilonitrile c'è stato un grande interesse da parte dell'Ente dell'Energia americano[3] per produrre fibre di carbonio a partire da bioacrilonitrile. L'elevato interesse in fibre di carbonio derivate da polibioacrilonitrile è dovuto al fatto che questo settore crescerà significativamente, spinto dalla motivazione di ridurre il peso dei veicoli automobilistici. Per adesso nessuno processo industriale è stato realizzato per la sintesi dei due monomeri da biomasse, in parte dovuto al basso prezzo del petrolio, ma anche alla necessità di migliorare ancora i processi proposti soprattutto nell'allungare la vita dei catalizzatori e diminuire le diverse reazioni parassite. Occorre vedere realizzati i primi impianti dimostrativi per avere una visione positiva del futuro di questi processi di chimica di base a partire da biomasse. In questa nota si riporteranno i dati di letteratura sulla sintesi di biopropilene, di bioacroleina, di acido bioacrilico e di bioacrilonitrile. Per la produzione di acido bioacrilico sono state proposte come molecole piattaforma, biopropilene, glicerina, acido fumarico, acido lattico, lattato di metile ed acido 3- idrossipropionico. Per la produzione di bioacrilonitrile sono state proposte come molecole piattaforma biopropilene, glicerina, acido glutammico, acido 3-idrossipropionico ed acido propionico.

Produzione di biopropilene

Il biopropilene può essere ottenuto da biopropano, coprodotto nella produzione di biodiesel per idrogenazione di oli vegetali per ottenere "green diesel", processo realizzato dall'Eni a Marghera[4]. Il biopropilene può anche essere prodotto da bioetanolo con le seguenti reazioni: deidratazione ad etilene, dimerizzazione a buteni e metatesi dei buteni ottenuti con l'etilene non reagito a propilene[5], un impianto doveva essere realizzato in Brasile, ma non è stato mai costruito a seguito del basso prezzo delle materie prime da petrolio. A partire da biopropilene si può ottenere bioacro-

leina, acido bioacrilico e bioacrilonitrile con gli stessi impianti utilizzati attualmente da propilene ottenuto da combustibili fossili, ossia non è necessario mettere a punto nuovi processi.

Produzione di bioacroleina

L'acroleina è sintetizzata attualmente esclusivamente per ossidazione del propilene ed è utilizzata, in gran parte, per la produzione di acido acrilico e di L-metionina e polimeri, copolimeri, lattici solubili in acqua, adesivi e inchiostri[1]. Diversi sono stati gli studi in questi ultimi anni sulla sintesi di bioacroleina a partire da glicerina, coprodotta nella produzione di biodiesel, ottenuto per transesterificazione di oli vegetali e grassi animali con metanolo ed in particolare 1 kg di glicerina è coprodotta per 10 kg di biodiesel prodotto. La bioacroleina è ottenuta per deidratazione della glicerina a temperatura fra 275-350°C con diversi catalizzatori acidi con concentrazione in acqua della glicerina dal 10 al 35%, ma c'è la formazione di diversi sottoprodotti ed oligomeri a partire da glicerina e da acroleina che portano alla disattivazione dei catalizzatori per la formazione di coke. Le proprietà ottimali di un catalizzatore acido per la produzione di bioacroleina sono le seguenti: la presenza di soli centri acidi di Bronsted medio-forti, perché centri acidi forti portano alla formazione di oligomeri e centri acidi deboli portano a sottoprodotti; l'assenza di centri acidi di Lewis che sono responsabili della formazione di sottoprodotti; devono essere termicamente stabili dato che tutti i catalizzatori devono essere rigenerati con ossigeno a 500 °C per eliminare il coke ed anche stabili alla presenza di vapore ad alta temperatura per la presenza sempre di acqua con la glicerina. Per diminuire gli effetti negativi della formazione di oligomeri si è cercato di utilizzare solidi mesoporosi che facilitano il desorbimento veloce dell'acroleina formata ed anche l'utilizzo di ossigeno per eliminare il coke formato. I catalizzatori acidi utilizzati per la sintesi di bioacroleina sono stati[1] eteropoliacidi ($H_3PW_{12}O_{40}$, $H_4SiW_{12}O_{40}$, $H_4PMo_{11}VO_{40}$) supportati su diversi supporti, zeoliti (ZSM-5, MCM41, Beta zeolite, HY and SBA-15) ed ossidi misti a base di WO_3. Sono qui di seguito riportati alcuni dei migliori risultati ottenuti. Con un catalizzatore[6] a base di 30% di acido fosfotungstico supportato su Nb205, con 10% glicerina ed acqua a 325°C è stata ottenuta una conversione del 99,8% di glicerina con una selettività in acroleina del 92% fino a 5 ore di TOS (time on stream). Con un catalizzatore[7] a base di 10% di WO_3 supportato su ZrO_2 monoclino a 300°C con il 20% di concentrazione di glicerina in acqua, è stata ottenuta una conversione del 100% di glicerina ed una selettività in acroleina di 82% per 100 ore di TOS.

Produzione di acido bioacrilico da glicerina

L' acido acrilico e i sui alchilesteri sono utilizzati per produrre polimeri, copolimeri, rivestimenti in lattice idrosolubili, adesivi e inchiostri ed è attualmente sintetizzato per ossidazione della acroleina[1]. A partite da biomassa l'acido bioacrilico è stato ottenuto a partire direttamente da glicerina, da bioacroleina, da acido lattico, da acido fumarico e da acido 3-idrossipropionico, questi tre acidi ottenuti per fermentazione da biomasse.[1]

Per ottenere l'acido bioacrilico da glicerina è necessario prima deidratare la glicerina a bioacroleina e successivamente ossidarla ad acido bioacrilico:

$CH_2OHCHOHCH_2OH \rightarrow CH_2=CHCHO + 2H_2O$

$CH_2=CHCHO + 1/2O_2 \rightarrow CH_2=CHCOOH$

Queste due reazioni sono state realizzate utilizzando diverse metodologie:

1) con un catalizzatore multifunzionale in un solo reattore in fase vapore;
2) con un catalizzatore multifunzionale in un solo reattore a bassa temperatura e con H_2O_2 come ossidante;
3) con due letti di catalizzatori diversi in serie nello stesso reattore in fase vapore;
4) con due reattori con catalizzatori diversi in serie in fase vapore;
5) con due reattori con catalizzatori diversi in fase vapore e con una fase di purificazione intermedia di acroleina a bassa temperatura.

I problemi nella sintesi di acido acrilico da glicerina sono molteplici e sono i seguenti: la presenza di un'alta quantità di acqua nella glicerina; la diversità delle temperature ottimali per la deidratazione della glicerina (300-320°C) e per l'ossidazione della bioacroleina (245-290°C); la glicerina non convertita proveniente dalla deidratazione crea sottoprodotti nel reattore di ossidazione.
Per questo motivo, l'approccio migliore per la produzione di acido acrilico è il reattore a due stadi con un stadio intermedio di purificazione dell'acroleina[8] in particolare una deidratazione della glicerina con catalizzatori a base di W03 supportato su ZrO_2 a 320oC con una concentrazione di glicerina dl 34,5%, 34,5% di H_2O, 23,7% di N_2 e 6,4% di O_2 con una purificazione dell'acroleina formata a bassa temperatura e l'ossidazione dell' acroleina purificata a 245o C con un catalizzatore a base di WMoVO ottenendo una concentrazione di acido acrilico del 14,7%. Ricercatori italiani hanno studiato[9] l'ossidazione della glicerina in un solo reattore ad acido bioacrilico con un catalizzatore multifunzionale a base di $W/Mo_{0,45}V_{0.04}O_5$ che a 290°C con 6% di glicerina, 12% di O_2, 40% di H_2O e 40% di N_2 ed hanno ottenuto una conversione della glicerina del 100% ed una selettività in acido bioacrilico del 51,2%.

Acido bioacrilico da acido lattico

La seconda via di sintesi di acido acrilico è l'utilizzo di acido lattico come materia prima. L'acido lattico è prodotto per fermentazione da zuccheri, ma anche da biomasse lignocellulosiche e amidacee sottoprodotti caseari, di rifiuti agro-industriali e alimentari[1] e può essere prodotto da queste biomasse con batteri diversi, funghi, amidi, microalghe e cianobatteri. La fermentazione batch è la tecnologia più utilizzata nella produzione di acido lattico, ma negli ultimi anni è stata proposta anche fermentazione in impianti continui per ridurre il costo di produzione.
L'acido bioacrilico si ottiene per semplice deidratazione dell'acido lattico:

$$CH_3CHOHCOOH \rightarrow CH_2{=}CHCOOH + H_2O$$

Ci sono diversi sottoprodotti che si formano durante questa deidratazione: l'auto esterificazione a lattide che è responsabile della formazione di prodotti pesanti che disattivano il catalizzatore e la decarbonilazione e decarbossilazione dell'acido lattico ad acetaldeide e condensazione a 2-3 pentadiene. Per aumentare la selettività in acido acrilico è necessario che il catalizzatore abbia centri acidi e basici medio-forti e la presenza di elementi alcalini per trasformare l'acido lattico in lattato come suo primo intermedio, minimizzando l'indesiderabile reazioni di decarbossilazionee

e di decarbonilazione. I principali catalizzatori utilizzati sono stati: sodio zeoliti (NaY e Na ZSM-5), solfati e fosfati modificati con centri basici.
È stato usato[10] come catalizzatore H-ZSM-5 modificato con l'aggiunta di 0,5% di concentrazione molare di NaOH e 0,5% di concentrazione molare di NaHP04 che a 350°C con una concentrazione di acido lattico in acqua del 30% ha dato una conversione di 96,8% con selettività in acroleina di 77,9% a 52 h di TOS. Un secondo catalizzatore investigato[11] è stato $Sr_2P_2O_7$ impregnato con 0,10% in peso di H_3PO_4 che a 400°C con una concentrazione del 20% di acido lattico ha presentato una conversione del 100% ed una selettività del 72,2% in acido bioacrilico fino a 4 h TOS. Infine è stato investigato un catalizzatore[12] a base di idrossiapatite di calcio ($Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$) modificata con NaOH a 350°C con acido lattico al 38% che ha dato una conversione del 90% e una selettività di 78% in acido bioacrilico fino a 60 h TOS.

Acido bioacrilico dal lattato di metile

Il lattato di metile può essere ottenuto in alte rese da saccarosio e recentemente è stato dimostrato che può anche essere ottenuto dalla cellulosa[1]. L'acido bioacrilico può essere ottenuto dalla deidratazione del lattato di metile ad acrilato di metile seguito dalla sua idrolisi:

$$CH_3CHOHCOOCH_3 \rightarrow CH_2=CHCOOCH_3 + H_2O$$
$$CH_2=CHCOOCH_3 + H_2O \rightarrow CH_2=CH\text{-}COOH + CH_3OH$$

Queste reazioni producono diversi sottoprodotti, in particolare dalla decomposizione del lattato di metile si ottiene acetaldeide e acido propionico. Per ottenere alte rese in acido bioacrilico è necessario utilizzare catalizzatori che presentono siti acidi e basici entrambi di moderata forza. Comunque è sempre presente una disattivazione dei catalizzatori a causa della polimerizzazione dei lattato di metile e la formazione di precursori di coke. La temperatura per la deidratazione e la concentrazione di lattato di metile sono superiori a quelle utilizzate nella deidratazione di acido lattico. I siti di base giocano un ruolo importante la reazione di deidratazione dal momento che possono dissociare i legami H-C migliorando la reazione. Un catalizzatore promettente investigato[13] è stata la zeolite MCM-41 modificata con 45% in peso di $Al_2(SO_4)_3$ e K_2HPO_4 (con rapporto 6/4) con la quale si è ottenuta una conversione del 90% e una selettività del 70% in acido bioacrilico a 20 di TOS.

Acido bioacrilico da acido fumarico

L'acido fumarico è ottenuto per fermentazione da diverse biomasse[1]. La sintesi di acido bioacrilico da acido fumarico, avviene per reazione con catalizzatori di metatesi (di Grubbs a base di Ru) con etilene[14]:

$$HOOCH\text{-}CH_2\text{-}CH_2COOH + CH_2=CH_2 \rightarrow 2CH_2=CH\text{-}COOH$$

È anche possibile produrre esteri di acido bioacrilico facendo reagire esteri di acido fumarico con etilene in presenza di un catalizzatore di metatesi.

Acido bioacrilico da acido 3-hydrossipropionico

L'acido 3-idrossipropionico può essere ottenuto mediante fermentazione di zuccheri, le aziende Basf, Cargill e Novoenzimes hanno messo a punto un impianto pilota per la produzione di acido 3-idrossipropionico ed hanno in programma lo scale-up per la sua trasformazione ad acido bioacrilico1. L'acidp bioacrilico è ottenuto per deidratazione dell'acido 3-idrossipropionico:

$HOCH_2$-CH_2COOH-> CH_2=CH-COOH+ H_2O.

I migliori risultati sono stati ottenuti[15] con una soluzione acquosa al 20% di acido 3-idrosipropionico con un catalizzatore a base di γAl_2O_3 ad alta area superficiale che a 250°C ha presentato una resa del 97% in acido bioacrilico con la conversione completa del reagente.

Bioacrilonitrile da glicerina

La sintesi di bioacrilonitrile da glicerina è realizzata con le seguenti due reazioni:

$CH_2OHCHOHCH_2OH$-> CH2=CHCHO + H_2O
CH_2=CHCHO +NH_3+1/2O_2-> CH_2=CHCN + 2 H_2O

Oppure può essere realizzata in un solo stadio:

$CH_2OHCHOHCH_2OH$ +NH_3 +1/O_2 -> CH_2=CHCN + 4H_2O

In letteratura, sono riportate quattro diverse vie di sintesi di bioacrilonitrile da glicerina: in uno stadio, direttamente dalla glicerina con un catalizzatore[16] a base di $VSbO_4$ drogato da Nb supportato su γ Al203; in due stadi dalla glicerina[17] via formazione di acroleina e poi sua ammonossidazione, in cui la deidratazione della glicerina è catalizzata da WO_3/TiO_2 (13,2% in peso di WO_3) e l'ammonossidazione dell'acroleina è catalizzata da ossidi misti di FeSb (Fe/Sb=0,6); in tre stadi dalla glicerina via acroleina[18], sua depurazione a bassa temperatura e poi ammonossidazione dell'acroleina purificata ad acrilonitrile, in cui il primo stadio è realizzato con catalizzatori a base di WO_3/ZrO_2 (9,3% WO_3) e l'ammonossidazione con catalizzatori a base di ossidi misti di Fe/Sb]; in uno solo stadio dalla glicerina[19], con forno a microonde impiegando H_2O_2 e NH_3 e catalizzatori a base di Sb_3/V/Al a 100°C.

In tutte queste diverse strategie il meccanismo di reazione è sempre lo stesso: la formazione di acroleina per disidratazione di glicerina, seguita dalla sua ammonossidazione ad acrilonitrile. Utilizzando glicerina come materia prima sono state ottenute le seguenti rese in acrilonitrile: con un solo reattore 48,5%, con due reattori in serie 40%, con due reattori in serie e purificazione intermedia di acroleina 60%, con un reattore con H_2O_2 come ossidante e microonde 32%.

Bioacrilonitrile da acido glutammico

La seconda molecola piattaforma utilizzata è stata l'acido glutammico che non ha alcun uso come precursore di alimenti o come mangime per animali ed è il sottoprodotto di trasformazioni di

biomasse che contengono proteine, come vinaccia, barbabietole da zucchero, canna da zucchero, cereali, da semi oleosi, come semi di palma, colza e jatropha e da residui colturali. L'acido glutammico è un rifiuto della produzione di sostanze alimentari che contengono proteine[2]. La sintesi di acrilonitrile da acido glutammico avviene in due fasi[20] decarbossilazione ossidativa di acido glutammico ad acido 3-cianopropanoico(CPA) ed decarbonilazione dell'acido 3-cianopropanoico nel secondo stadio ad acrilonitrile:

$HOOC\text{-}CH_2\text{-}CH_2CHNH_2COOH \rightarrow HOOCCH_2CH_2\text{-}CN \rightarrow CH_2{=}CHCN$

Il primo stadio si realizza a 4 °C con acido glutammico rapporto 1/1 di NaOCl in presenza di NaBr come catalizzatore con formazione di ipobromito di sodio che reagisce con l'acido glutammico per dare il CPA con conversione del 100% e una selettività in CPA del 90%. Il CPA prodotto nel primo stadio deve essere prima purificato e dopo soggetto a una reazione di decarbonilazione ed eliminazione per reazione con anidride acetica con rapporto 1/1 con il CPA in presenza di $PdCl_2$, trietilammmina ed altre sostanze organiche per produrre acrilonitrile; la reazione avviene 110 °C conformazione di diversi coprodotti ed una resa in acrilonitrile del 17%, così bassa perché dovuta alla sua degradazione.

Bioacrilonitrile da acidi propionici

La terza molecola piattaforma utilizzata è stato l'acido 3-idrossipropionico ottenuto per fermentazione degli zuccheri ottenuti da varie piante, in particolare da materiali cellulosici e da rifiuti agricoli[2] e che è stato ammonossidato a bioacrilonitrile[21]. Una quarta molecola piattaforma è stato l'acido propionico ottenuto per fermentazione da scarti forestali ed agricoli dall' US Department of Energy e che è stato direttamente ammonossidato a bioacrilonitrile[3].

CONCLUSIONI

La produzione di acido bioacrilico da acido 3-idrossipropionico sembra essere uno dei migliori approcci per produrne in alte rese da biomassa dato che sembra che non sia necessario purificarlo. A partite da glicerina la sintesi migliore per i due monomeri è il processo in due stradi con purificazione intermedia dell'acroleina. Uno svantaggio dell'utilizzo della glicerina è la breve vita del catalizzatore del primo stadio e l'avvelenamento del catalizzatore del secondo stadio da parte della glicerina non reagita proveniente dal primo reattore. Un altro svantaggio della glicerina come fonte di alimentazione è che viene prodotta da colture alimentari. Il principale svantaggio della produzione di acido lattico per fermentazione è la sua bassa produttività e costosa purificazione del prodotto. Un'altra promettente molecola piattaforma, pure derivata da biomasse non alimentare per la produzione di bioacrilonitrile, potrebbe essere l'acido glutammico, perché la molecola contiene già azoto e può essere facilmente trasformata in acrilonitrile rispetto al resto degli intermedi biomassa disponibili. Molto probabilmente nuovi catalizzatori dovranno essere sviluppati per la trasformazione dell'acido glutammico a bioacrilonitrile.

La produzione di bioacrilonitrile è nella sua infanzia ed è discutibile se sarà mai matura per un processo efficiente ed economicamente vantaggioso, così come la produzione di acrilonitrile dal

biopropilene. Finora, i più alti rendimenti di acrilonitrile sono stati ottenuti dalla glicerina, mentre altre biomasse derivate hanno dato finora risultati molto scarsi.
Non ci sono processi commercializzati attualmente che usano la biomassa per la produzione di acido bioacrilico e bioacrilonitrile, ma sono programmati per il prossimo futuro. L'etichetta "bio" desiderata avrà un prezzo elevato, ma il suo prezzo potrebbe essere diminuito nei prossimi anni. Per attribuire agli intermedi analizzati in questa nota il prefisso bio dovrà essere fatta una notevole quantità di ricerca fondamentale per studiare i percorsi di reazione dei vari precursori bio e di progettare nuovi catalizzatori multifunzionali per facilitare in modo efficace le reazioni desiderate.

BIBLIOGRAFIA

1) R. K. Grasselli, F. Trifirò, Concepts in Catalysis Rend .Fis. Accademia dei Lincei 2017 Springer
2) R. K. Grasselli, F. Trifirò, Topics in Catalysis 2016 59,1651
3) Aga Goial et al., https://aiche.confex.com/aiche/2015/webprogram/Paper429801.html
4) F. Cavani et al., Chemicals and fuels from biomass building blocks Wiley VCH 2016
5) D. Sanfilippo et al., Enciclopedia degli Idrocarburi 2006, VolII, 688.
6) B. Viswanadhan et al., Catalysis Letters 2014, 144(4), 744.
7) SR. Giunjupalli et al., Applied Surf. Science, 2014, 309,153.
8) J.LDubois et al., US 8530697B2 to Arkema.
9) A. Chierigato et al., ChemSusChem,2014b, 8, 398.
10) X.Zang et al., Chem Eng J. 2016, 284,934.
11) C. Tang et al., R.Soc. Chem.Adv,2014, 4,28875.
12) Y. Matssura et al.,Catalysis Commun.2014, 48,5.
13) B. Wang et al., 2014, RSC Adv 4,45679.
14) MJ. Burk et al., Brevet EP 2348008 A1.
15) L. Craciun et al.,US patent 2009/7538247.
16) M0. Guerrero- Perez et al., 2008, Chem Susclem 1(6),511.
17) C. Liebig et al Appl Catal B Environ 2013, 170,132.
18) J. LDubois US pat 2010/0048850 to Arkema.
19) M0 Guerrero – Perez et al Appl. Catal, B Environ.2014,148,601.
20) J. Le Notre et al.,Green Chem 2011,13,807.
21) A. But et al., Chem Suschem, 2012, 5(7),1199.
22) http://energy.gov /sites /prod/files/2015 /04/f21/biochemical_conversion _guriel_0200.pdf

SETTORE 4

>FARMACEUTICA E BIOTECNOLOGIE PER LA SALUTE<

MEMBRI DEL GRUPPO DI LAVORO

Settore – Farmaceutica e biotecnologie per la salute

Coordinatori	
NCNBIO	**Maria Luisa Nolli**
INSTM	**Federica Chiellini**
Componenti	
ASSING	**Rosa Goffredo**
BIRD&BIRD	**Ida Calogero**
BRACCO	**Federico Maisano**
CNR	**Michele Saviano**
DOMPÈ	**Marcello Allegretti**
ELETTRA SINCROTRONE TRIESTE	**Paola Storici**
ENEA	**Patrizia Galeffi**
FARMINDUSTRIA	**Giuseppe Caruso**
LIVANOVA / SORIN GROUP	**Silvia Pascale**
MENARINI GROUP	**Marco Mansani**
	Leonardo Sibilio
	Daniela Zinzi
OSPEDALE PEDIATRICO BAMBIN GESÙ	**Monica Gunetti**
STMICROELECTRONICS	**Andrea Pagni**
	Marco Bianchessi
UNIONCAMERE	**Giuseppe Salonia**
UNIVERSITÀ DI ROMA TOR VERGATA – INUIT	**Roberto Braglia**
UNIVERSITÀ DI PISA	**Romano Danesi**
WARRANT HUB	**Lisa Bregoli**

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 1

NUOVI APPROCCI DELLE TECNOLOGIE OMICHE

Il sequenziamento dell'intero genoma e gli sviluppi tecnologici degli ultimi anni hanno permesso lo sviluppo delle "tecnologie omiche", in grado di studiare i diversi insiemi molecolari (omici). Gli sviluppi metodologici hanno permesso di studiare l'insieme dei geni (genoma), degli RNA (trascrittoma), delle proteine espresse (proteoma) e delle piccole molecole (metaboloma) presenti negli organismi viventi. In sostanza lo sviluppo degli approcci "omici" anche in modo combinato ha permesso lo sviluppo della "medicina molecolare", che coinvolge lo studio dei meccanismi molecolari per spiegare le variazioni osservate a livello biologico. Questo porta alla possibilità di identificare e caratterizzare biomarcatori di malattia o di monitorare a livello molecolare l'effetto di approcci terapeutici a livello delle vie metaboliche o di interazione con le diverse componenti molecolari, utilizzando l'approccio della Biologia dei Sistemi. Questo approccio permette anche di evidenziare gli eventuali effetti collaterali di terapie mediche, divenendo un importante supporto per lo studio dettagliato delle malattie, sia per lo sviluppo di metodi diagnostici sia per la valutazione delle terapie, in tempi notevolmente ridotti.

Genomica

Il genoma è l'insieme di tutte le informazioni scritte nel DNA di ogni organismo. Ogni funzione legata all' esistenza delle varie forme di vita è determinata dalla sequenza delle 4 basi fondamentali di cui è costituito il DNA (Adenina, Timina, Guanina e Citosina). Con il progetto Human Genome, completato nel 2001, è stato possibile determinare precisamente l'intera sequenza di basi del DNA umano, e da allora le metodiche si sono raffinate ed i costi sono calati di oltre un milione di volte, al punto che oggi è possibile determinare la sequenza di DNA specifica di ogni individuo per poche migliaia di euro in pochi giorni di lavoro. Nonostante ciò, il significato di questi dati è tutt'altro che chiaro e l'interpretazione del genoma è una delle attività che oggi impegna maggiormente i ricercatori. Da tempo è noto il codice genetico, che permette di dedurre dalle sequenze di DNA, le proteine che vengono costruite dalla cellula durante il processo noto come "espressione genica". Questo ha permesso di decifrare parte del genoma, in quanto le sezioni di codice genetico che codificano le proteine presentano dei pattern facilmente identificabili, denominati propriamente "geni". La maggior parte del contenuto del genoma rimane però ancora indecifrato, e la sua funzione poco chiara. Inizialmente queste porzioni erano state frettolosamente ed erroneamente denominate "DNA spazzatura", finchè si è verificato che danni o variazioni indotte in queste aree provocano modifiche nell'organismo. Oggi è chiaro che le aree non codificanti del DNA svolgono funzioni di controllo, ma i meccanismi precisi sono tutt'altro che noti. È comunque chiaro che la maggior parte delle differenze tra i vari individui e anche tra specie affini risiede principalmente nel DNA non codificante, essendo le proteine praticamente identiche per ogni individuo della stessa spe-

cie (salvo piccole variazioni, che non giustificano la varietà che si riscontra nella popolazione).
Il punto di partenza per lo studio del genoma è il "sequenziamento" del DNA, ovvero la lettura della sequenza delle 4 basi di cui è costituito. L'intero genoma umano è costituito da circa 3 miliardi di basi che in termini di memoria valgono 6 giga bit di informazione. Come detto, in meno di 20 anni si è passati dai quasi 3 miliardi di dollari per sequenziare il primo essere umano, ai circa mille dollari di oggi. Questo grazie all'avvento delle tecniche denominate di "Next Generation Sequencing" che grazie ad array molto densi permettono in parallelo di sequenziare milioni di frammenti di DNA. Con tecniche di bioinformatica è possibile allineare i frammenti sequenziati per ricostruire la sequenza completa.

Proteomica

Le proteine sono gli attori biochimici nei processi cellulari e di conseguenza le malattie o gli stati patologici quasi sempre si manifestano a livello di proteine. Inoltre le proteine sono il target della maggior parte dei farmaci disponibili. Per questo l'analisi di specifiche proteine di interesse farmacologico è prassi comune nella ricerca biologica e medica. Le tecniche tradizionalmente usate sono basate su gel di separazione e anticorpi per riconoscere e/o identificare le proteine in studio. Nell'era dell'analisi di interi genomi e della "systems biology" è importante poter determinare come la totalità delle proteine espresse, cioè il proteoma, varia nel sistema biologico di interesse. In pratica, questa possibilità, trasforma il tradizionale approccio della ricerca biomedica dall'analisi "proteina per proteina" all'esplorazione dell'intero proteoma cellulare. Di fatto, la caratterizzazione accurata su larga scala delle proteine di un sistema biologico ha dovuto attendere lo sviluppo di metodi di analisi potenti, il più importante dei quali si basa sulla spettrometria di massa, un metodo di misura praticamente universale, altamente specifico e sensibile fino al livello della singole molecole. È bene sottolineare che la proteomica è idealmente complementare ai metodi usati in genomica, come ad esempio ai microarrays, che sono molto potenti nel generare dati a livello di DNA o RNA, ma che per loro natura non possono interrogare direttamente il proteoma.

A differenza del genoma, il proteoma ha un ampio range dinamico e varia in funzione del tempo e della condizione. Se consideriamo modificazioni post-traduzionali e isoforme proteiche, la definizione della composizione proteica di un determinato sistema biologico può essere soggetta a diverse interpretazioni. Le tecnologie proteomiche sono quelle che negli ultimi anni hanno subito il più ampio stravolgimento dal punto di vista della strategia di investigazione. Infatti, si è passati dalla metodologia "gel-based" con un grande intervento manuale da parte dell'operatore, a quella "Mass Spectrometry (MS)-based" caratterizzata dalla completa automazione dell'analisi.
Il primo miglioramento nelle tecnologie proteomiche si è ottenuto nel passaggio da spettrometri di massa che individuavano i peptidi dal loro peso molecolare (spettrometri MALDI-TOF) a strumenti che ne permettono anche il sequenziamento (MS/MS analysis). L'approccio gel-based ha permesso lo sviluppo dell'analisi proteomica, ma presenta delle limitazioni in quanto necessità di operazioni manuali nell'esecuzione del gel, con relativa variabilità delle separazioni legata sia all'operatore che all'ambiente di laboratorio, e relativa bassa produttività.
In alternativa all'approccio gel-based è stata proposta la metodologia MS-based MudPIT (Multidimensional Protein Identification Technology). In questo caso la miscela complessa di pro-

teine non viene separate nelle sue diverse componenti, ma digerita enzimaticamente, e la miscela peptidica risultante analizzata mediante cromatografia liquida accoppiata alla spettrometria di massa tandem (MS/MS). Questo metodo porta ad un numero limitato di operazioni manuali, comunque facilmente e normalmente automatizzabili, con gli step successivi di eluizione e analisi con lo spettrometro di massa completamente automatiche. Inoltre, dato che è prevista una riduzione di tutte le proteine a peptidi, non ci sono problemi legati alle dimensioni, o alla idrofobica delle proteine. I miglioramenti tecnologici, sia degli spettrometri (in termini di velocità di acquisizione, di risoluzione nella misura del rapporto massa/carica e di sensibilità) sia dei sistemi cromatografici (in termini di riproducibilità e di riduzione dei flussi) hanno permesso di migliorare la sensibilità fino ad attomoli (per una proteina da 20 kDa, corrisponde a pochi femtogrammi) e di aumentare il numero di proteine identificate da centinaia a diverse migliaia per ogni campione analizzati.

Metabolomica

Se gli acidi nucleici (DNA e RNA) rappresentano l'inizio della catena di causa-effetto di tutti i meccanismi biochimici a livello cellulare, l'ultimo evento è la creazione dei metaboliti, cioè i prodotti finali delle reazioni chimiche della cellula. Una loro misura precisa è, quindi, altrettanto utile ai fini diagnostici, soprattutto per il fatto che i metaboliti sono presenti in campioni facilmente acquisibili (es. sangue o urina). Il pattern metabolico è rappresentato da un numero notevole di molecole semplici, la cui analisi può essere fatta singolarmente con tecniche classiche di chimica analitica, pertanto tradizionalmente l'indagine è limitata a poche molecole più comuni. Negli ultimi tempi questo scenario sta subendo dei cambiamenti radicali. La possibilità di misurare contemporaneamente un numero sempre più elevato di metaboliti con un test semplice e unico permette di aumentare la molteplicità e, quindi, il livello informativo del test. Questo tipo di approccio viene chiamato metabolomica. La metabolomica descrive il profilo chimico in termini dei metaboliti a basso peso molecolare presenti in cellule, tessuti, organi e fluidi biologici. I metaboliti possono essere visti come il prodotto finale dell'espressione genica o dell'attività proteica (enzimi), che definiscono così il fenotipo biochimico di un sistema biologico nel suo insieme. Diversi studi hanno focalizzato la metabolomica come indagine per lo sviluppo di metodi per la diagnosi di stati patologici, per lo studio della loro progressione e per la valutazione dell'efficacia terapeutica attraverso la conoscenza dei meccanismi molecolari delle patologie. La metabolomica é in grado di studiare la complessità metabolica delle cellule, dei tessuti, come anche di interi organismi.
Questa tecnologia si avvale di due fasi sequenziali principali:

1) una fase sperimentale, basata su tecnologie di analisi quali la Risonanza Nucleare Magnetica (NMR), sui sistemi di separazione quali la gas-cromatografia (GC), la cromatografia liquida (LC) o l'elettroforesi capillare (CE), spesso accoppiate alla spettrometria di massa (MS);
2) l'analisi multivariata dei dati e la loro interpretazione; quest'ultima fase prevede anche la consultazione di apposite librerie di dati.

Dopo le due fasi sequenziali principali, la fase successiva è rappresentata dall'estrazione e dall'interpretazione delle informazioni in un contesto biologico complesso, caratterizzato dalla grande

quantità di dati prodotta dalle tecnologie viste sopra.
Esistono almeno tre differenti approcci concettuali in metabolomica:

1) l'analisi target è applicata da molto tempo e comprende la determinazione e la quantificazione di un piccolo insieme di metaboliti noti (obiettivi), utilizzando una particolare tecnica analitica specifica;
2) il profilo metabolico mira all'analisi di un grande set di composti, sia pre-identificato sia sconosciuto rispetto alla loro natura chimica;
3) l'impronta metabolica, la "firma" o il profilo di massa del campione di interesse viene generata e quindi confrontata in un ampio campione di popolazione per valutare le differenze tra i dati. Quando i segnali in grado di discriminare in modo significativo i campioni vengono rilevati, i metaboliti sono identificati e la rilevanza biologica di tali composti può essere chiarita notevolmente.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Genomica

Le tecniche di Next Generation Sequencing (NGS), lavorando su frammenti del genoma ottenuti per rottura casuale del DNA, hanno la limitazione di non poter rilevare le cosiddette "traslocazioni", ovvero sequenze di DNA che nella cellula si sono spostate nel punto sbagliato. Normalmente questi eventi portano alla morte della cellula, ma a volte la cellula sopravvive e il nuovo genoma porta a malfunzionamenti e spesso è causa scatenante di alcuni tumori. Tecniche di sequenziamento che operino direttamente sulla molecola di DNA intera permetteranno di identificare direttamente questi eventi.

Inoltre, un passaggio fondamentale del NGS, è l'amplificazione in vitro del DNA. Questo significa che non viene sequenziato direttamente il DNA nativo, ma sue copie artificiali ottenute tipicamente attraverso la PCR. Questo passaggio non conserva le cosiddette informazioni "epigenetiche", ovvero modificazioni chimiche sulla catena portante del DNA che quindi sono state inizialmente ignorate. Recentemente si è capita l'importanza delle informazioni epigenetiche per la regolazione dell'espressione genica legata al differenziamento cellulare ed è nata l'esigenza di tecniche di sequenziamento in grado di riportare non solo la sequenza di basi, ma anche le loro eventuali modificazioni epigenetiche. Questo è possibile solamente attraverso metodiche che lavorino sulla molecola di DNA originale, senza passare attraverso la sua amplificazione in vitro.
Per questo motivo, diversi sistemi basati su chip attivi, che utilizzano le tecniche costruttive della microelettronica, sono stati proposti negli ultimi anni. In particolare l'uso dei cosiddetti "nanopori" sembra molto promettente e già i primi prodotti sono apparsi sul mercato molto recentemente. Anche se la precisione nella determinazione della sequenza è ancora molto lontana dai sistemi NGS (il tasso di errore è superiore al 20%) il fatto di leggere direttamente le singole molecole ha il vantaggio di conservare l'ordine macroscopico della sequenza e quindi identificare le eventuali traslocazioni, evitando poi l'oneroso processo informatico di riallineamento dei frammenti. Inoltre, lo strumento completo di sequenziamento risulta estremamente piccolo, collegabile ad un portatile attraverso la porta USB, permettendone l'uso ovunque al di fuori dei laboratori.

Proteomica

Lo studio del proteoma umano offre enormi potenzialità. La prima e più generale è la possibilità di capire la correlazione tra genoma e fenotipo. La proteomica può essere utilizzata in diversi ambiti, come la comprensione della patologia del cancro o altre patologie o la diagnostica o più specifici come per esempio la proteomica delle cellule staminali o altre linee cellulari o tessuti. Altre importanti potenzialità, riguardano l'utilizzo di questa tecnologia per lo sviluppo di diagnostici e di farmaci, con nuove opportunità nella ricerca biomedica e i futuri sistemi sanitari. Ad esempio, le informazioni ricavate dai progetti di proteomica possono essere utilizzate nell'ambito dell'identificazione di biomarker, che possono essere impiegati nella clinica medica per diagnosticare l'insorgere di una malattia, monitore il suo progredire e l'effetto di una terapia. Da non trascurare è l'importanza dell'integrazione dei dati tra proteomica, genomica e metabolomica che fornisce maggiore confidenza nella scelta del biomarker. L'area dello studio dei biomarker è molto importante nella moderna medicina, perché permette diagnosi certe e precoci di malattie e di conseguenza ne favorisce la prognosi. Va sottolineato come l'analisi proteomica MudPIT fornisce una gran quantità di dati; per questo è stato di fondamentale importanza sviluppare ed applicare sistemi computazionali specifici, al fine di estrarre in modo semplice ed automatico i "segnali molecolari" correlati alla variazione degli stati fiso-patologici o all'azione di principi attivi o terapie. In particolare, sono disponibili software che aumentano la confidenza di identificazione delle proteine, di confronto delle liste proteiche e di correlazione con i pathway metabolici. In questo modo è possibile rappresentare le lunghe liste di proteine identificate in una unica immagine che evidenzia sia quelle che hanno subito variazioni di abbondanza sia le loro interazioni.
Lo sviluppo di una roadmap per la traduzione delle tecnologie proteomiche in strumenti clinici richiede la stretta collaborazione tra ricercatori di diversa estrazione, con una forte partnership tra pubblico e privato. Attualmente le tecnologie necessarie per un laboratorio di proteomica si basano sull'utilizzo di spettrometri di massa ad alta risoluzione, con potenze di calcolo per l'analisi dei dati e il loro storage, in strutture con personale altamente qualificato. Questo sottolinea l'importanza di investire in infrastrutture di rete accessibili all'intera comunità scientifica biomedica. Considerato l'enorme potenziale della moderna proteomica, è fondamentale che più risorse vengano investite per rendere le tecnologie disponibile a una più vasta comunità scientifica.

Metabolomica

Negli ultimi anni, gli sviluppi tecnologici hanno incrementato notevolmente l'acquisizione di nuove conoscenze nel campo della metabolomica. Lo studio del metabolismo cellulare sta emergendo come un campo di assoluta importanza in svariati campi di ricerca biomedica, come le malattie neurologiche, autoimmuni e nelle patologie tumorali. Studi recenti dimostrano una relazione stretta fra i sistemi di trasduzione del segnale e i meccanismi di regolazione del metabolismo cellulare. Questo, di fatto, mette in luce la rilevanza crescente dell'alimentazione corretta come disciplina di prevenzione e cura delle malattie. È, quindi, necessario promuovere e sostenere la ricerca in questo campo, allo scopo di incentivare la conoscenza delle alterazioni dei processi metabolici che si verificano nelle malattie. Lo studio del metabolismo a livello sistemico, cioè in grado di quantificare e analizzare la dinamica di decine o centinaia di metaboliti in contemporanea

(approccio ad alto rendimento), è oggi reso realistico grazie a nuove tecnologie e all'accoppiamento con metodologie di analisi bioinformatiche. Da alcuni anni si teorizza la necessità di confrontare i risultati ottenibili dallo studio dei diversi insiemi molecolari per ottenere una reciproca conferma dei dati. Finora però sono pochi gli studi realizzati di integrazione dei dati "omici". Ciò è dovuto sia a problemi legati alla necessità di avere nello stesso laboratorio un'ampia varietà di tecnologie che devono essere continuamente aggiornate, quali ad esempio sequenziatori di nucleotidi, spettrometri di massa ed NMR, sia alla complessità dei diversi insiemi da integrare.
È quindi necessario promuovere: 1) la realizzazione di una rete di servizi tecnologici in grado di fornire servizio per l'analisi metabolomica ad alto rendimento di campioni biologici; 2) mettere a disposizione fondi specifici per lo sviluppo di progetti di ricerca di ampio respiro focalizzati sullo studio del metabolismo nelle malattie umane. L'integrazione fra laboratori di servizi e laboratori sperimentali di ricerca è necessaria per creare un'infrastruttura non più dipendente da servizi esterni, spesso internazionali, assai costosi e non sempre efficienti. Inoltre, il coinvolgimento dei clinici è essenziale per avere accesso a campioni biologici derivati dai pazienti e per contestualizzare i progetti. È, infine, necessario promuovere la ricerca in campo bioinformatico, allo scopo di mettere a punto le procedure necessarie all'analisi della massa di dati derivata dalle quantificazioni sperimentali.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA ED ALL'ESTERO

Le ricerche proteomiche e metabolomiche hanno dato un grande impulso allo sviluppo di tecnologie, che permettono lo studio delle proteine e dei metaboliti senza necessità di una loro purificazione e/o isolamento. Tali tecnologie "omiche" (o "omics") stanno rendendo possibile lo studio su vasta scala (high-throughput) di campioni complessi e la definizione a livello molecolare di un quadro d'insieme dei processi e dei sistemi biologici. Tali dati, insieme con quelli derivati dalla genomica, costituiscono la base per una rapida espansione delle conoscenze sul funzionamento del singolo gene, sulle complesse interazioni multigeniche, sui processi e le interazioni tra le varie molecole, eventi che nell'insieme determinano i comportamenti biologici osservabili su varia scala. Più recentemente, l'applicazione delle tecnologie omiche si è estesa ulteriormente, comprendendo anche lo studio di interazioni complesse (ad esempio interazione tra proteine e farmaci). Tutto questo risulta di particolare interesse nell'ottica della tematica salute, sia per gli aspetti medici sia per quelli nutrizionali ed ambientali, in quanto la definizione a livello molecolare e supramolecolare degli stati fisiologici e patologici nell'uomo e delle loro variazioni a seguito di modifiche indotte, sembra poter costituire una solida base per la realizzabilità di una "Medicina di precisione o personalizzata". In questo contesto, con l'analisi proteomica attualmente si riesce a effettuare con le stesse analisi simultaneamente l'identificazione di marcatori, sia per la diagnostica sia per la predizione di risposta a terapie, e investigare i meccanismi alla base, sia delle malattie che dell'azione di farmaci, condizione fondamentale per una reale Medicina Personalizzata.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

Dall'analisi riportata, risulta indispensabile un forte investimento per lo sviluppo delle tecnologie connesse sia alla moderna proteomica che alla metabolomica, focalizzate sullo studio del prote-

oma e del metabolismo nelle malattie umane. Risulta, inoltre, importante investire in una rete di servizi tecnologici, in grado di fornire servizio per le aziende per analisi proteomica e metabolomica ad alto rendimento di campioni biologici. Basandosi su queste considerazioni sarebbe auspicabile un finanziamento pubblico-privato di 30-40 milioni di euro.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 2

TECNOLOGIE INNOVATIVE PER IL DRUG DISCOVERY

L'identificazione e la caratterizzazione di nuovi prodotti farmaceutici e diagnostici, più selettivi ed efficaci, rappresenta una priorità di enorme interesse industriale. Infatti, la disponibilità di farmaci sempre più attivi e ben tollerati è uno dei fattori che maggiormente contribuiscono ad elevare la qualità della vita e a contrastare patologie ad alto impatto sociale. In quest'ambito, lo sviluppo di nuove tecnologie applicate al "Drug Discovery", con ricadute nella chimica farmaceutica, devono necessariamente accogliere le nuove sfide della ricerca e fornire ai ricercatori di raggiungere gli obiettivi strategici fissati a livello nazionale e comunitario, come riportati nei documenti nazionali delle programmazioni PON e POR, del Programma HORIZON2020 della Comunità Europea per il periodo 2014-2020 e nelle bozze del 9° Programma Quadro per la Ricerca Europea per il periodo 2021-2027. Tali obiettivi sono prevalentemente rivolti al trattamento di patologie croniche, quali diabete, tumori, patologie cardiovascolari e malattie neurologiche fortemente invalidanti (p.es. Alzheimer, Parkinson, Sclerosi Multipla, etc.) che, insieme alle patologie rare e alle patologie dell'anziano, rappresentano i principali bisogni di cura della popolazione europea sia per il loro effetto sulla mortalità, che per la conseguente riduzione della qualità di vita e gli evidenti costi sociali. Analogo discorso vale per la ricerca mirata ad individuare nuove strategie di cura per disordini gravi quali l'obesità e le patologie infettive, globalmente diffuse.

Nel considerare l'impulso dato dallo sviluppo tecnologico alla chimica farmaceutica, il progresso nelle tecniche di disegno razionale di molecole, di chimica combinatoriale e lo sviluppo dell'High Throughput Screening (HTS) ha dimostrato che l'uso integrato di nuove tecnologie è in grado di accelerare il processo di identificazione di nuovi composti candidati allo sviluppo farmaceutico. Tra le tecnologie rilevanti nel settore farmaceutico, nel prossimo futuro, l'HTS riveste un ruolo chiave. Parallelamente, lo sviluppo di software avanzati per la bioinformatica, i miglioramenti della automazione e della strumentazione, porteranno ad ulteriori sviluppi in ambito di High Content Screening (HCS): una tecnologia innovativa che permette un'analisi multiparametrica su cellula singola, permettendo l'imaging simultaneo di diverse cellule viventi. L'analisi dei dati di HCS è un processo complesso rispetto ad altri saggi biologici poiché il dato che si misura non è direttamente correlato all'effetto su un unico target, ma è la combinazione di molti eventi cellulari che agiscono contemporaneamente, tenendo conto che molti degli effetti sono più qualitativi e morfologici che quantitativi. Quindi, l'implementazione delle tecnologie di Systems Biology e data mining sarà necessaria per mettere a disposizione dei ricercatori nuovi strumenti per l'identificazione dei pathways maggiormente coinvolti e per la valutazione degli effetti fenotipici osservati al fine di combinare tutte queste informazioni con l'effetto che le molecole inducono nel sistema studiato. Sebbene la maggior parte dei farmaci approvati ogni anno per l'immissione in commercio sono

composti da piccole molecole (small molecules) di origine chimica o da derivati naturali, all'incirca il 25% dei nuovi composti sul mercato appartiene alla categoria dei cosiddetti "farmaci biologici" che sono generalmente anticorpi, peptidi, vaccini o cellule opportunamente ingegnerizzate e sono diretti contro target che non posso essere aggrediti dalle small molecules. Gli anticorpi e i peptidi rappresentano la grandissima maggioranza di questa categoria di farmaci e sono largamente utilizzati per la terapia di malattie invalidanti o letali quali tumori, malattie autoimmuni e diabete.
Gli anticorpi monoclonali si pongono anche come nuova potenziale strategia di prevenzione delle infezioni, agendo contro specifici fattori di virulenza e tossine. Infatti, gli anticorpi monoclonali sono sempre più testati come terapia adiuvante per le infezioni acquisite in ospedale e da germi multiresistenti. Un altro vantaggio, nell'ambito di una strategia volta al contenimento dello sviluppo di germi non più suscettibili agli antibiotici attualmente disponibili (antimicrobial stewardship) è che questo approccio ha il potenziale di ridurre l'emergenza di nuove resistenze agli antimicrobici.
Va sottolineato che per favorire lo sviluppo di questi nuovi farmaci biologici, devono essere implementate tecnologie e modalità per la creazione e lo screening (HTS ed HCT) di librerie sempre più ampie e complesse di anticorpi o peptidi. Allo stesso tempo vanno sviluppate nuove tecnologie che permettano di modificare le proprietà dei farmaci biologici per aumentarne, ad esempio, l'efficacia, la biodisponibilità nell'organismo e la capacità di raggiungere specificamente le cellule bersaglio.
Negli ultimi anni la ricerca nel campo farmaceutico si è indirizzata sempre di più verso la "medicina di precisione" con lo scopo di discriminare biomarcatori specifici che possano essere utilizzati per stratificare i pazienti affetti da una determinata patologia. Lo studio e la definizione di biomarcatori specifici per determinate malattie sono la base per migliorare la precisione diagnostica ed anche per sviluppare nuove terapie mirate. In questo contesto si inserisce quindi il concetto di teranostica e di medicina personalizzata. In generale DNA, RNA, proteine, metaboliti possono tutti funzionare come biomarcatori, ma possono essere anche potenziali target terapeutici. In questo modo, oltre ai bersagli già ben noti quali le chinasi, le fosfatasi e le proteasi in generale si inseriscono importanti nuovi target molecolari quali le proteine di membrana (recettori e canali ionici), i complessi macromolecolari multimerici, le proteine "scaffold", ed i target non proteici. Un esempio di questo tipo sono alcune classi di RNA non codificanti come i micro RNA (miRNA), di cui si conosce la rilevanza biologica ma si hanno limitate conoscenze strutturali e di "druggability". Viste le complessità dei nuovi target che si stanno presentando all'orizzonte dello sviluppo farmaceutico innovativo è importante che le nuove tecnologie, unite alle competenze specifiche presenti in laboratori di ricerca non industriali, forniscano le conoscenze per superare le difficoltà dell'industria a sviluppare farmaci contro target atipici e ad alto rischio. È necessaria quindi una forte spinta innovativa per la maggior condivisione di conoscenze, competenze e risorse per lo sviluppo di farmaci contro target non convenzionali.
In questo contesto si nota necessariamente che il processo di scoperta del farmaco, che origina dallo screening massivo di librerie chimiche o naturali, va integrato con ulteriori approcci per l'identificazione e l'ottimizzazione delle molecole. L'approccio strutturale alla progettazione del farmaco (Structure-Based Drug Design, SBDD) è vincolato alla disponibilità della struttura tridi-

mensionale del bersaglio biologico, ottenuta principalmente mediante cristallografia a raggi X con luce di sincrotrone (MX), o attraverso tecniche avanzate di risonanza magnetica nucleare (NMR), adiuvate da studi computazionali di modelling e di dinamica molecolare. Al fianco di queste tecniche, riconosciute come fondamentali per il design razionale di nuovi farmaci in fase preclinica, sta emergendo una nuova frontiera della biologia strutturale dettata dai recenti avanzamenti tecnologici nel campo della microscopia elettronica criogenica su singola particella (cryo-EM). L'utilizzo di microscopi elettronici di nuova generazione permette oggi di ottenere informazioni strutturali con un livello di risoluzione atomica (< 3,0 Å) su target molecolari atipici, non perseguibili con MX o NMR. Esempi di questo tipo sono le proteine di membrana, i grossi e/o dinamici complessi macromolecolari, e più in generale tutte le proteine che non formano cristalli o sono troppo grandi per l'analisi con l'NMR. Con il premio Nobel alla chimica del 2017, è stato riconosciuto l'enorme impatto che le innovazioni tecnologiche del cryo-EM stanno avendo nella comprensione dei meccanismi molecolari di sistemi complessi. Importanti contributi si sono già riscontrati anche in ambito farmaceutico con l'identificazione, validazione e caratterizzazione di nuovi target terapeutici anche in complesso con inibitori/modulatori, fornendo preziose informazioni sul loro meccanismo d'azione e potenziale druggability. Nel prossimo futuro ci si aspetta è che la crio-microscopia elettronica su singola molecola non cristallina diventi uno strumento essenziale nel processo di drug discovery, soprattutto nelle fasi di hit-to-lead e di lead-optimization, permettendo di sfruttare l'approccio SBDD su target non convenzionali, fino ad ora considerati "non-trattabili". Molte industrie farmaceutiche si stanno interessando al cryo-EM con diversi approcci: stabilendo collaborazioni con laboratori academici, usando facility centralizzate, CRO o consorzi, oppure investendo in-house nell'acquisto di strumentazione e in risorse umane specializzate al fine di inserire il cryo-EM nelle pipeline di sviluppo.

Tutte le informazioni sulle relazioni struttura-attività sono fondamentali per il processo di progettazione molecolare. Solitamente dopo una prima selezione di collezioni di molecole mediante HTS, è fondamentale potersi avvalere della struttura tridimensionale del target biologico, in modo da poter utilizzare tecniche di docking molecolare nelle successive fasi di ottimizzazione. Nel caso in cui non sia nota la struttura del bersaglio biologico, ma sia nota quella di un suo ligando, è possibile utilizzare tecniche di Ligand-Based Drug Design (LBDD) per identificare molecole con un profilo migliore. Un'altra tecnologia di drug discovery che è in pieno sviluppo per l'individuazione di composti capostipite si basa su tecniche di screening virtuale (virtual screening). Queste metodiche di screening di tipo HTS in silico permettono di valutare l'interazione di librerie di molecole reali o virtuali con un farmacoforo, o con un ligando a struttura nota, o con un modello sperimentale o teorico di una proteina bersaglio. Un ulteriore approccio innovativo è quello del Fragment-Based Drug Design (FBDD) che consente la progettazione di farmaci mediante l'analisi strutturale di frammenti chimici che si legano in modo specifico al target proteico. Questo approccio permette di vagliare un numero molto limitato (poche migliaia) di piccole molecole. I frammenti chimici così identificati vengono poi elaborati per ottenere nuovi composti guida per lo sviluppo di farmaci innovativi.

Un altro approccio diverso ma di grosso interesse per la ricerca farmaceutica dei prossimi anni riguarda il riposizionamento di farmaci che sono già in fase avanzata di sviluppo. Ad oggi si con-

tano più di 7000 molecole in fase di sviluppo 2 e 3 per le quali è già stata dimostrata la sicurezza in uomo da studi di fase 1. Di questi candidati farmaci solo una minima parte supera le fasi di valutazione di efficacia e arriva sul mercato per una precisa indicazione terapeutica. Le principali cause di questo elevato tasso di abbandono dipendono non solo da problematiche di tollerabilità e tossicità che si palesano nelle prime fasi di sviluppo clinico, ma anche e soprattutto dalla mancanza di efficacia osservata nei pazienti relativamente ad una specifica indicazione terapeutica. L'errata definizione degli endpoint clinici per l'indicazione proposta, la mancata dimostrazione dell'efficacia o la non significatività statistica dei risultati, portano ad un blocco nello sviluppo di molecole potenzialmente di grande impatto scientifico ed economico, in quanto il loro sviluppo clinico ha un costo che va da milioni a centinaia di milioni di euro. In mancanza di strategie di riposizionamento questo enorme capitale è inevitabilmente sprecato. La strategia del riposizionamento dei farmaci richiede un approccio interdisciplinare razionale, basato sulla comprensione del meccanismo d'azione e integrato alle conoscenze dei processi della malattia e degli specifici agenti terapeutici. I metodi computazionali esistenti partono o da una prospettiva chimica, basata sul farmaco, o da una prospettiva clinica, basata sulla patologia. Per integrare i due approcci sono necessari algoritmi innovativi da applicare in analisi computazionali per l'identificazione e lo sviluppo di "vecchi" farmaci per nuove indicazioni.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

L'industria farmaceutica è sottoposta a una pressione crescente derivata da diversi fattori, che includono le perdite economiche dovute alla scadenza dei brevetti, ai costi sempre più elevati dei sistemi sanitari nazionali, alle richieste sempre più stringenti delle agenzie regolatorie e alle richieste sempre più urgenti di identificare nuove molecole più selettive e con minori effetti collaterali per patologie ad alto impatto sociale (patologie tumorali, dell'invecchiamento, etc.)

Il numero di farmaci approvati negli ultimi anni ha subito un aumento. I farmaci raccomandati per l'immissione in commercio nel 2017 dall'Agenzia europea dei medicinali (Ema) sono 92. Di questi, 35 contengono un principio attivo mai autorizzato prima nell'Unione Europea. I numeri sono in crescita: nel 2016 l'agenzia aveva dato il via libera a 81 medicinali, di cui 27 a base di nuovi principi attivi. La lista dei 92 farmaci autorizzati nel 2017 include due terapie avanzate e 19 trattamenti per le malattie rare. La maggior parte delle approvazioni si è concentrata nell'area dell'oncologia, seguita da quella delle malattie infettive e dall'endocrinologia. Il costo stimato per lo sviluppo di un nuovo farmaco sul mercato è valutato intorno a 1.8 miliardi USD ed è un valore in crescita. Da queste premesse si comprende che, per poter sviluppare e potenziare i prodotti e i processi avviati negli ultimi anni nell'ambito della chimica farmaceutica, sono cruciali nuovi investimenti in moderne tecnologie.

Siamo nel mezzo di una transizione che vedrà il passaggio dall'utilizzo di modelli locali, basati su analisi statistiche, a modelli dinamici, che terranno conto della specifica fisiologia del paziente. In questa direzione si stanno muovendo le tematiche di alcune linee di ricerca europee, per esempio nell'ambito del Programma Horizon 2020. Infatti, alcuni progetti europei sono focalizzati su tematiche del tipo "in silico clinical trials" con l'evidente scopo di creare massa critica e di promuovere ricerca ed innovazione in questo settore emergente della modellistica di dati.

Forte impulso sarà dato anche dallo sviluppo delle piattaforme scientifiche e tecnologiche in sinergia con le grosse infrastrutture di ricerca nazionali ed internazionali che gestiscono facility multi-tecnica altamente specializzate come sorgenti di luce di sincrotrone, laser a elettroni liberi (FEL) e grossi microscopi offrendo accesso ad utenti esterni per utilizzi specifici ad alto contenuto scientifico e tecnologico. Esempi virtuosi in Italia sono il sincrotrone Elettra e il FEL FERMI gestiti da Elettra Sincrotrone Trieste S.C.p.A che tra i suoi obiettivi ha anche quello di fornire tecnologia e know-how alla ricerca per lo sviluppo farmaceutico sia industriale che non. Tali infrastrutture favoriscono un approccio interdisciplinare e transdisciplinare che promuove studi finalizzati alla comprensione dei meccanismi molecolari delle malattie a beneficio di studi di R&S per il trattamento di patologie complesse ad elevato impatto sociale. L'uso di tecnologie di screening più avanzate, applicate a collezioni di molecole meglio caratterizzate e con la conoscenza della struttura 3D dei target terapeutici, permetterà di ridurre i tempi di sviluppo e di limitare il rischio di fallimento associato alla scoperta di un nuovo farmaco. Tra le tecnologie a maggior impatto nel prossimo periodo, l'HTS ha un ruolo chiave. Le implementazioni future dovranno avere i seguenti obiettivi: lo sviluppo di saggi HTS (microHTS) ancor più miniaturizzati; lo sviluppo di screening HTS in silico sufficientemente accurati per vagliare a livello computazionale nuove molecole per il drug discovery; la "target end point selection", e lo sviluppo di nuove tecnologie cosiddette "label-free", già usate in formato non HTS per screening secondari su "hit compounds" selezionati e in fase di ottimizzazione del "lead compound". A tutto questo, va aggiunta l'implementazione di flussi di processo per l'utilizzo del cryo-EM tali da essere efficaci con i throughtput e le tempistiche richieste del moderno drug discovery. Infine, lo sviluppo di tecnologie computazionali interdisciplinari, focalizzate sulla comprensione del meccanismo della patologia, permetterà di supportare la parte di sviluppo del farmaco, con la riduzione dei tempi per l'identificazione di "lead compound" grazie alle informazioni già disponibili sulle molecole in termini di farmacocinetica, safety e tossicologia.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Gli elevati investimenti necessari per sviluppare nuove tecnologie in campo chimico-farmaceutico, sia in termini di costose e sofisticate strumentazioni che in termini di risorse umane, rendono evidente la necessità, in Italia, di uno sforzo congiunto pubblico-privato per superare il gap con i paesi tecnologicamente più all'avanguardia, europei ed extra-europei, nei quali è sempre più forte e consolidata la presenza di multinazionali farmaceutiche che, grazie alle risorse a disposizione, danno un forte impulso all'innovazione tecnologica del settore. Gli orientamenti tecnologici del prossimo periodo si focalizzeranno su nuovi target, quali sistemi dinamici e/o di grosse dimensioni quali i complessi proteina-proteina, Proteina/DNA/RNA, e le proteine di membrana a cui si aggiungono target di nuova concezione come i miRNA, aprendo le porte a nuovi razionali terapeutici.

Sarà quindi essenziale la predisposizione di nuove tecnologie per il drug design, per la corretta interpretazione dei dati e l'assemblaggio di librerie di molecole adeguate ai nuovi target, nell'ambito delle quali, l'approccio combinatoriale e multi parallelo, insieme al rispetto dei principi di diversità e di mantenimento delle proprietà di "drug-likeness", sarà un prerequisito chiave per il

successo dell'approccio. I nuovi farmaci nascono da una conoscenza sempre più profonda del funzionamento dei processi biologici che si vogliono curare e correggere, delle relazioni tra struttura-attività-funzione delle nuove molecole, dallo sviluppo di tecnologie per il drug delivery. In questo contesto sono vincenti team di ricerca specializzati e multidisciplinari, caratterizzati dalla collaborazione fra medici, matematici, bioinformatici, per aumentare la conoscenza dei legami tra DNA, stili di vita, ambiente e malattie. Quindi, risulta importante la partecipazione e l'accesso a infrastrutture di ricerca multi-tecnica presenti a livello europeo e internazionale quali i sincrotroni e i consorzi di facility, che offrono accesso all'utilizzo di tecnologie e attrezzature specializzate e avanzate.

L'industria farmaceutica si conferma un grande patrimonio industriale per lo sviluppo economico e scientifico in Italia. I dati relativi agli ultimi anni ne evidenziano il valore generato in termini di occupazione di qualità, produzione hi-tech, esportazioni, investimenti. L'Italia è diventata il primo Paese produttore dell'Unione Europea e la cosa si concretizza portando maggiori investimenti, crescita dell'occupazione e facendo da traino per la crescita di tutto il paese anche nel Mezzogiorno.

Le imprese in Italia vogliono continuare a creare valore nel territorio e ad essere protagoniste dell'innovazione biofarmaceutica. In questi settori la maggior parte delle aziende farmaceutiche sta facendo investimenti sia autonomamente che, soprattutto, nell'ambito di collaborazioni strategiche con altre aziende e/o enti di ricerca o accademici, che possano contribuire con specifico know-how, sia in campo biologico che chimico di sintesi, dalla scala di laboratorio fino alla produzione industriale. A tale proposito, l'innovazione tecnologica si compirà una volta migliorata la sostenibilità dei processi produttivi, che abbiano un minimo impatto ambientale e che garantiscano all'industria italiana ed europea un grado di competitività, nel campo della produzione di materie prime, che si è andata perdendo.

Anche le collaborazioni scientifiche sono in aumento grazie alla partecipazione ad iniziative nazionali (Programma Operativo Nazionale "Ricerca e Innovazione" 2014-2020) e regionali, come a quelle europee nell'ambito dei Programma Quadro e a iniziative finanziate dalle aziende quali l'Innovative Medicine Initiative (IMI). In particolare, una delle iniziative IMI più rilevanti è la creazione della European Lead Factory, una partnership pubblico-privato (PPP) progettata per promuovere l'innovazione nel drug discovery garantendo strette collaborazioni e miglior comunicazione tra i soggetti impegnati. L'Italia, a causa della sua frammentazione, non fa parte del Consorzio, né a livello di grandi né a livello di medio-piccole industrie farmaceutiche. Analoghe iniziative sono state implementate in Italia, quali il consorzio "Collezione Nazionale di Composti Chimici e Centro Screening (CNCCS)", consorzio pubblico-privato costituito nel 2010 dal Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), dall'Istituto Superiore di Sanità (ISS) e da IRBM Science Park.

Nei prossimi 5 anni ci sarà un cambio sostanziale nella capacità di calcolo dei computer di prossima generazione; a tal fine la Commissione Europea, in ambito di programma H2020, ha finanziato con quasi un miliardo di euro i progetti capaci di sfruttare pienamente le opportunità che il calcolo exascale permetterà di fare, a totale vantaggio di progetti innovativi in campo di drug discovery. L'Italia sta investendo in questo settore. Infatti, oltre al centro di calcolo CINECA, che è secondo in Europa per potenza di calcolo, è in corso la messa in opera con fondi infrastuttura-

li dal Programma Operativo Nazionale "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 di un centro di calcolo massivo per la genomica, proteomica e drug discovery nelle regioni del Mezzogiorno. Questi investimenti risultano indispensabili per avere a disposizione strumenti per il supporto in Italia di progetti innovativi nel drug discovery. La creazione in Italia della massa critica di competenze e di progetti mediante il finanziamento di progetti mirati, permetterebbe all'intero sistema paese di giocare un ruolo di primo piano nel settore della ricerca di base nel drug discovery.
È evidente, quindi, che è importante per la competitività dell'Italia nel campo della chimica farmaceutica del prossimo futuro, garantire la continuità dell'investimento per finanziare il consolidamento di collaborazioni pubblico-privato esistenti e l'attivazione di nuove, anche mediante la partecipazione a consorzi di ricerca.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

Per il potenziamento e lo sviluppo di queste tecnologie e per la maggiore integrazione in una rete omogenea e completa, sono necessari degli investimenti importanti per rispondere alla richiesta della ricerca in un settore che richiede grandi competenze scientifiche e importanti risorse strumentali. Basandosi su queste considerazioni sarebbe auspicabile un finanziamento pubblico-privato di 40-50 milioni di euro.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 3

LA NUOVA DIAGNOSTICA IN VITRO

Con il termine "diagnostica in vitro" si intendono quelle metodiche di indagine medica effettuate attraverso test diagnostici a partire da campioni di materiale biologico prelevati dal paziente. Esempi ben noti sono l'analisi nelle urine o nel sangue dei livelli di glucosio. La connotazione "in vitro" deriva dal fatto che storicamente i test venivano eseguiti all'interno di provette che erano appunto in vetro.

Il concetto di diagnostica in vitro si contrappone a quello di diagnostica in vivo, nella quale i test diagnostici sono condotti direttamente nell'organismo vivente, mediante metodiche di visualizzazione di tessuti o di molecole specifiche, come la Risonanza Magnetica Nucleare o la Positron Emission Tomography.

I test in vitro ricoprono un ruolo fondamentale nel processo di diagnosi, prognosi e impostazione della condotta terapeutica. Inoltre, sono essenziali per il monitoraggio del decorso della patologia e quindi per verificare se la terapia sta ottenendo i risultati sperati o se deve essere cambiata. Inoltre i risultati ottenuti sono spesso più oggettivi rispetto a quelli ottenuti attraverso la diagnostica per immagini e questo comporta almeno due vantaggi: l'indipendenza della risposta diagnostica dall'interpretazione del medico ed una più facile automazione del test, non richiedendo appunto l'intervento di un esperto per l'interpretazione.

La diagnostica in vitro deve individuare e spesso quantificare in maniera accurata, sensibile e specifica sostanze di natura endogena (metaboliti, vitamine, ormoni) ma anche di natura esogena (proteine di origine virale). Recentemente, a queste opzioni si sono aggiunti gli acidi nucleici (DNA ed RNA), che per hanno la particolarità di avere una composizione chimica sempre costante, ma di differire tra loro per l'ordine in cui le subunità molecolari sono disposte. Ciò permette di sviluppare e ottimizzare metodiche diagnostiche versatili e indipendenti dall'obiettivo clinico; per questa particolarità si usa distinguere le indagini sugli acidi nucleici dal resto della diagnostica in vitro denominando questa branca come "Diagnostica Molecolare"

Per definizione, la diagnostica in vitro è l'insieme di tutte le analisi effettuate su campioni organici quali fluidi biologici, tessuti o cellule. Il fluido biologico più frequentemente utilizzato è il sangue, sia esso intero o sotto forma di plasma o siero. Nel sangue è normalmente possibile individuare e misurare la gran parte dei marker diagnostici di cui disponiamo. Un'altra ovvia matrice è rappresentata dalle urine. Per motivi specifici si utilizzano anche altre matrici, come il liquidocefalorachidiano (ad es. Infezioni virali del Sistema Nervoso Centrale). Nel caso della diagnostica molecolare, in particolare quando l'oggetto di indagine è rappresentato dal genoma del paziente ad esempio per individuare predisposizioni genetiche a sviluppare malattie o legate alla risposta soggettiva a determinati farmaci, una comoda opzione per ottenere un campione rappresentativo

è il tampone buccale, in quanto è semplice da ottenere e totalmente non invasivo, non richiedendo nemmeno l'uso di aghi di prelievo.
Storicamente la diagnostica in vitro si è concentrata sullo sviluppo di tecniche mirate all'individuazione e quantificazione di target specifici, realizzando test mirati ad un solo tipo di molecola o a poche molecole specifiche, spesso di natura proteica, aventi una forte correlazione con la condizione patologica oggetto dell'indagine. Questa limitazione deriva dal fatto che le tecnologie disponibili hanno una sensibilità tale da richiedere una quantità di campione relativamente grande per ogni molecola oggetto di indagine e i test sono "distruttivi" nei confronti del campione.
Quindi, il campione biologico che potenzialmente conterrebbe una quantità immensa di informazioni utili al clinico per diagnosi precoce e indirizzamento della terapia è sempre stato utilizzato al minimo delle proprie potenzialità e in modo relativamente inefficiente visti anche i costi, sia di natura economica che di disagio per il paziente, associati al prelievo del campione stesso.
Con l'aumento della sensibilità e della molteplicità dei test, si rende disponibile, a partire dallo stesso quantitativo di campione biologico, un numero di informazioni molto più grande, con una serie di vantaggi:

- È possibile avere un quadro più dettagliato della condizione del paziente.
- L'esame può rivelare disfunzioni o patologie che non erano inizialmente ipotizzate dal clinico, e che quindi non sarebbero nemmeno state indagate.
- Un singolo test può accorpare quelli che in precedenza erano diversi test singoli. Questo porta risparmio di costi, sia per il fatto di ridurre il carico di lavoro al laboratorio di analisi, sia per l'economia di scala delle case produttrici, che possono produrre un numero minore di test con volumi più alti.

Questa tendenza che ha portato a spingere sempre più a fondo le indagini per estrarre anche le informazioni più recondite, ha anche aperto la strada ad una tecnica rivoluzionaria che prende il nome di "biopsia liquida". Il concetto parte dal presupposto che il sangue, attraversando tutti i comparti dell'organismo, entra in contatto con tutti gli organi i quali riversano nel torrente ematico tutti i vari composti prodotti, componenti cellulari e anche cellule morte o vitali e maligne, quindi in una goccia di sangue è contenuta tutta l'informazione sullo stato dell'organismo, ma in maniera estrememente diluita e disordinata.
La capacità di ricostruire questa informazione, andando a selezionare le singole cellule o le loro sottocomponenti circolanti quali organelli, DNA, RNA (miRNA) ecc. promette di ottenere un quadro definito di tutto l'organismo, a partire da un esame estremamente semplice.
In particolare i primi studi si sono concentrati sulle indagini in campo oncologico. Attualmente, nella cura dei tumori, uno dei primi passi è quello di ottenere informazioni sulla natura cellulare della malattia: il grado di malignità, la potenziale risposta a una determinata terapia, la presenza di specifiche mutazioni ecc.
Questa indagine passa attraverso il prelievo localizzato di tessuto tumorale attraverso una biopsia, che risulta essere un test relativamente invasivo. Inoltre deve essere ben mirato per avere la sicurezza di prelevare cellule rappresentative del tumore stesso. L'obbiettivo della biopsia liquida è quello di evitare questo passaggio, e ottenere le stesse informazioni a partire da un semplice

prelievo ematico. Oltre ai vantaggi legati al disagio del paziente, i vantaggi evidenti sono:

- Minori costi legati al prelievo.
- Possibilità di evidenziare tumori anche senza avere preventivamente individuato la loro presenza ed averli localizzati tramite diagnostica per immagini.
- Potenzialità di utilizzare questa tecnica come screeening preventivo a cui sottoporre anche fasce della popolazione a rischio relativamente moderato, col vantaggio di riuscire ad individuare eventuali manifestazioni tumorali quando sono ancora ai primi stadi di sviluppo e quindi curabili con alte probabilità di sopravvivenza.
- Possibilità di ripetere più volte il test per monitorare il decorso della cura e valutarne l'efficacia, essendo quindi in grado di alleggerire la cura in caso di buona risposta terapeutica, oppure prendere immediate contromisure nel caso in cui la cura si stia rivelando inefficace.

La base della biopsia liquida è costituita dalla biologia molecolare. È infatti grazie alla grande quantità di dati che si ottengono attraverso il sequenziamento del DNA, che diventa possibile estrarre informazioni significative da un piccolo campione di sangue.
I passaggi fondamentali per implementare questa metodica, partono dall'isolamento del materiale di interesse all' interno del campione, solitamente si tratta di specifiche popolazioni cellulari o di DNA libero circolante nel sangue. Segue poi un test molecolare sul materiale genetico che può essere mirato (ad esempio tramite microarray o qPCR) oppure generico (tramite sequenziamento). Per finire, si passa all'estrazione del risultato dai dati raccolti, attraverso algoritmi sempre più sofisticati di bioinformatica, per produrre delle risposte in una forma utilizzabile dal clinico in modo preciso e affidabile. Quest'ultima parte è quella sulla quale ci si aspettano i progressi maggiori nei prossimi anni: con il progredire della conoscenza a livello molecolare dei vari tumori e l'accumulo di dati storici sul decorso e la risposta alle cure dei pazienti trattati in questi anni, l'interpretazione diventerà sempre più accurata e le predizioni sempre più affidabili.
La Diagnostica Molecolare ha quindi il compito di rilevare e quantificare molecole di DNA e RNA, siano esse endogene (alterazioni genetiche congenite o acquisite come quelle del cancro) o esogene (sequenze di acidi nucleici specifiche di microorganismi). La maniera più semplice per rilevare gli acidi nucleici sono acidi nucleici sintetizzati in laboratorio la cui sequenza nucleotidica sia complementare al marker di DNA o RNA in questione. La Diagnostica Molecolare è oggi costituita da un insieme complesso e in continua evoluzione di metodiche, che vanno dalle tecniche di amplificazione, al sequenziamento del DNA ai microarray.
Oltre all'interesse verso il DNA per le ragioni citate e all'RNA per ragioni analoghe (alcuni virus contengono solamente RNA), recentemente è cresciuto l'interesse verso i microRNA.
I microRNA (miRNA) sono brevi filamenti di RNA, che si trovano a circolare nel flusso ematico, che agiscono come regolatori post-trascrizionali svolgendo un ruolo essenziale nella patogenesi di numerose malattie. Possono quindi essere utilizzati sia come biomarcatori sia come agenti terapeutici. I miRNA sono ideali come biomarcatori perchè:

a) sono indicatori tessuto-specifici e patologia-specifici;
b) correlano con il grado di severità della patologia;
c) hanno un'elevata stabilità nei fluidi biologici.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Point of Care di Immunodiagnostica

Come accennato, l'Immunodiagnostica sfrutta l'intrinseca specificità e affinità degli anticorpi per rilevare e quantificare marker specifici di natura proteica. È anche ben noto come l'avvento degli anticorpi monoclonali e lo screening in vitro di librerie anticorpali (ad esempio, ma non solo, in fagi) ha dato un impulso fondamentale allo sviluppo dell'Immunodiagnostica.

Nonostante quindi l'Immunodiagnostica si basi fondamentalmente su una reazione che conosciamo molto bene sin nei dettagli molecolari e persino atomici, cioè la reazione antigene-anticorpo, il campo è tutt'altro che maturo e non ha certamente esaurito gli spazi di innovazione.

Gli spazi di innovazione in Immunodiagnostica vanno ricercati nell'interazione complessa tra lo sviluppo di nuove tecnologie e l'evoluzione del mercato della diagnostica in vitro.

Partendo dall'evoluzione del mercato della diagnostica in vitro, si assiste ad una progressiva polarizzazione del mercato. Ad un estremo troviamo una forte domanda di concentrazione dell'esecuzione dei saggi di immunodiagnostica in pochi centri sui quali, fondamentalmente per ridurre i costi, convergono gli esami diagnostici da centri periferici nei quali sarebbe inefficiente mantenere una struttura sub-ottimizzata di diagnostica in vitro.

All'altro estremo troviamo una tendenza in rapida evoluzione che vuole portare l'esecuzione dei test diagnostici sempre più vicino e alla portata dei pazienti, consentendo al paziente stesso di eseguire in maniera rapida e immediata esami diagnostici senza per questo dover andare in ospedale o nello studio del medico, lungo la linea di quanto già oggi si fa con il monitoraggio da parte del paziente stesso del glucosio.

La tendenza a portare alcuni esami di diagnostica in vitro al paziente è solo un aspetto di una tendenza più ampia di evoluzione del mercato della Salute, nel quale appare assai probabile che, in un futuro non molto distante, si assisterà ad un'autentica rivoluzione del concetto stesso di Salute nel quale i parametri che definiscono lo stato di salute del paziente saranno a portata di smartphone e verranno inviati via web alle strutture sanitarie per una medicina sempre più preventiva e personalizzata. La polarizzazione del mercato ha forti implicazioni tecnologiche, che al momento sono solo in parte risolte. La centralizzazione spinge la tecnologia verso l'automazione e la riduzione dei costi. La diagnostica a portata del paziente implica una tecnologia di facile esecuzione, che fornisca il risultato quasi in tempo reale, integrabile con l'utilizzo di strumenti personali per il ricevimento dei dati e la trasmissione immediata al medico mediante per esempio il proprio smartphone o altri personal devices.

Le implicazioni tecnologiche necessarie per dare una risposta alla polarizzazione del mercato dell'immunodiagnostica sono formidabili e complesse.

Le direzioni lungo le quali si dovrebbe dunque investire per dare una risposta alla centralizzazione del mercato della diagnostica in vitro sono:

- Sistemi HW e SW in grado di supportare rapidità di esecuzione dei test di immunodiagnostica e la più completa automazione, dalla gestione del campione del paziente all'integrazione del dato nella rete di Laboratorio, al fine di rendere i sistemi sempre più semplici, rapidi e automatici.

- Nuovi sistemi di segnale. I test attuali di immunodiagnostica utilizzano sistemi diversi per rilevare la reazione antigene-anticorpo, basati in genere su molecolechemiluminescenti. L'intensità del segnale influenza in maniera determinante sensibilità e specificità del saggio. Il miglioramento della qualità dei saggi e dell'automazione passa certamente anche attraverso la possibilità di disegnare nuovi sistemi di segnale, più potenti degli attuali senza tuttavia aumentare il rumore di fondo, compatibili con una chimica efficiente ed economica. Una interessante novità in questo senso è rappresentata dalla metodica denominata "protein PCR", che coniuga i vantaggi della PCR che amplificando il DNA permette di rievare e quantificare, con precisione fino ad una singola molecola, con la detection di proteine, che per loro natura non si prestano ad una duplicazione. La tecnica è ancora agli albori e non ha ancora raggiunto il grado di affidabilità delle tecniche classiche, ma presenta diversi vantaggi, tra cui quello di utilizzare la stessa strumentazione della biologia molecolare, permettendo quindi di svolgere con un solo strumento, sia analisi proteomiche che genetiche.
- Sistemi HW, SW e di segnale integrati tra loro per l'esecuzione di saggi automatizzati in multiplex, per la determinazione di parametri multipli sullo stesso campione in un unico test.

Le principali direzioni lungo le quali investire per il mercato vicino al paziente sembrano essere:

- Ideazione e realizzazione di sensori in grado di rilevare la presenza di specifici marker proteici o chimici in maniera non invasiva, senza dover prelevare i fluidi biologici da analizzare.
- Sviluppo di sistemi di comunicazione tra sensori e personal devices per l'acquisizione e trasmissione dei dati in tempo reale al medico mediante App dedicate.
- Miniaturizzazione dei sistemi di rilevazione ed elaborazione del dato diagnostico.

L'analisi dei miRNA in ricerca e in clinica si è notevolmente affermata. Tuttavia, le diverse metodologie di analisi hanno portato a risultati spesso discrepanti. Per un corretto confronto dei risultati ottenuti da studi diversi, dovrà essere definita una standardizzazione dei saggi e dei metodi di normalizzazione dei dati utilizzati. La tecnica attualmente riconosciuta come gold standard per l'analisi dei miRNA è la Real-time PCR che permette di effettuare una valutazione dei livelli di miRNA in modo semiquantitativo o quantitativo. Un metodo di analisi dei miRNA basato sulla Real-time PCR è stato recentemente introdotto all'interno di un trial clinico volto alla valutazione dell'efficacia di un farmaco, essendo stato validato per i parametri di specificità, linearità, precisione ed accuratezza. I dati prodotti da questa analisi sono stati inoltre sottoposti ad una rigorosa procedura di normalizzazione anch'essa validata. Per raggiungere la molteplicità necessaria per un test miRNA generico, le attuali metodiche sono però inefficienti: per avere un quadro completo servirebbero diverse corse complete di realtime PCR per paziente, con un costo insostenibile. Un sistema integrato per la quantificazione automatica dei miRNA otterrebbe entrambi gli obbiettivi: ridurrebbe i costi e nel contempo produrrebbe dei risultati standardizzati per una affidabile interpretazione.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA ED ALL'ESTERO

Ad oggi esistono diversi prodotti commerciali basati sul concetto di immunoassay a flusso la-

terale, sia per uso da parte di personale medico che da parte del paziente stesso, l'esempio più comune è rappresentato dal test di gravidanza. Le attuali limitazioni di questi sistemi sono rappresentate dalla sensibilità relativamente bassa e dall'impossibilità di essere estesi alla biologia molecolare.

Vista la forte domanda di test di biologia molecolare decentralizzati, negli ultimi anni sono apparsi sul mercato decine di strumenti miniaturizzati per analisi di DNA, basati soprattutto sulla metodica di Realtime PCR. Sono anche apparsi strumenti basati su varie versioni di amplificazione isoterma (es. LAMP) che semplificando il controllo termico riducono il costo e l'ingombro dello strumento, ma a spese della precisione quantitativa e spesso gli assay risultano poco robusti e difficili da progettare.

L' aspetto più critico, sul quale molte di queste esperienze hanno in realtà mostrato tutti i loro limiti e hanno ritardato l'adozione massiccia delle piattaforme PoC, è la reale facilità d'uso da parte di personale non specializzato e soprattutto al di fuori dell'ambito del laboratorio. Molto spesso questi strumenti non sono altro che una versione ridotta degli strumenti classici da laboratorio; fintanto che l'utilizzo di un test molecolare in PoC non raggiunga in termini di semplicità e robustezza quello dei test di gravidanza, il loro uso resterà relegato a poche applicazioni di nicchia.

In Italia esistono singole realtà di eccellenza per ciascuna delle competenze critiche richieste (a partire dalle nanotecnologie di cui in Italia esiste un'ampia rete di competenze) per l'ideazione e l'implementazione di un POC competitivo e a prezzi accettabili. La sfida sarà riuscire a mettere insieme tali competenze, in un'ottica di coordinamento efficiente e attento ai tempi di realizzazione.

L'interesse verso i miRNA sia nell'ambito della ricerca sia a livello industriale come marcatori e agenti terapeutici sta avendo una crescita esponenziale.

Un vantaggio nell'uso dei miRNA nella diagnostica è rappresentato dalla generalizzabilità dei test basati su di essi. Infatti il loro numero è relativamente piccolo (circa 2000) ed essendo coinvolti nella regolazione delle risposte cellulari in tutti i comparti dell'organismo, un test generico che li quantificasse in toto (o per lo meno una parte significativa) permetterebbe di essere poi declinato a posteriori mediante un'interpretazione specifica per le varie patologie. Permetterebbe inoltre di identificare squilibri che segnalano patologie in corso, senza avere a priori indicazioni che suggeriscano indagini mirate.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

Si ritiene che, data la diversità, molteplicità e complessità delle competenze richieste, e data la sfida relativa alla capacità di industrializzare le soluzione proposte a costi contenuti, l'investimento complessivo per giungere a una prova di principio con un prototipo avanzato di PoC di immunodiagnostica per almeno un biomarker sia intorno a 1 milione di €.

Nel caso di un PoC per biologia molecolare, l'investimento sulla piattaforma salirebbe ad almeno 5 milioni di €, ma il successivo sviluppo di saggi richiederebbe poche decine di migliaia di € ognuno, al netto degli eventuali costi legati ai trial clinici, che variano da caso a caso.

L'intera pipeline per lo sviluppo di un tool basato sui miRNA come biomarcatori include la realizzazione di un sistema integrato per la quantificazione dei miRNA di interesse, la loro verifica su un'ampia popolazione e la validazione clinica del metodo utilizzato. Il costo di attività necessarie

per lo sviluppo di simili tool è paragonabile alle spese dello sviluppo di un test diagnostico. Per dare una stima del costo della sola validazione di un metodo per l'analisi di uno specifico miRNA si può considerare che la spesa necessaria si attesta intorno ai 15 Milioni di euro in tre anni.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 4

PRODUZIONE DI BIOFARMACI E VACCINI

I biofarmaci sono macromolecole di origine biologica generalmente di natura proteica (anticorpi, ormoni, citochine, vaccini a subunità). A differenza dei farmaci di sintesi, essi sono prodotti con le tecniche del DNA ricombinante in colture di cellule di microorganismi e/o di mammifero. Si stima che attualmente siano disponibili sul mercato oltre 250 biofarmaci ricombinanti, 7 dei quali rientrano tra i 10 farmaci più venduti nel 2015. La maggior parte di questi, come l'insulina, l'ormone della crescita umano e l'interferone alfa, è prodotta utilizzando come cellule "ospite" batteri o lieviti. Proteine strutturalmente più complesse, come gli anticorpi o alcuni vaccini, vengono invece prodotte in cellule derivate da organismi eucariotici superiori. La funzionalità di queste proteine infatti dipende da modificazioni post-traduzionali, come la glicosilazione, che non possono essere effettuate dalle cellule procariotiche.

Molte di queste proteine ricombinanti, e gli anticorpi monoclonali in particolare, hanno un grande potenziale per trattare una molteplice varietà di stati patologici negli animali, in particolare nell'uomo.

Le proteine ricombinanti rappresentano uno dei gruppi più promettenti fra gli agenti terapeutici dalla scoperta degli antibiotici, ma diversi problemi accompagnano il loro uso. In particolare, la somministrazione sistemica di tali proteine può provocare una risposta immunitaria che può portare alla distruzione della proteina stessa. Pertanto, una volta somministrate al paziente, il destino di molte proteine ricombinanti, ottenute seguendo procedure laboriose e costose, può essere di una loro rapida eliminazione attraverso meccanismi proteolitici.

Le difficoltà sopra menzionate possono essere esacerbate in situazioni in cui i siti target per l'azione del farmaco siano le membrane mucosali, noti siti di proteolisi potenziata. Tali membrane mucosali comprendono il tratto orale/intestinale, il tratto bronchiale/nasofaringeo ed il sistema riproduttivo, utilizzati come siti di ingresso/infezione da molteplici agenti patogeni. La somministrazione locale di farmaci proteici ricombinanti potrebbe eludere alcune di queste difficoltà, facilitando una maggiore efficacia della proteina ed una diminuzione nel catabolismo della stessa. Tuttavia, vi è una scarsità di metodi per la somministrazione locale di farmaci in aree come l'intestino, il tratto bronchiale ed il sistema riproduttivo. Una possibile e promettente strategia in via di sviluppo è di veicolare direttamente la proteina/farmaco di interesse tramite il microorganismo procariotico produttore, senza purificarla dalle cellule che la stanno esprimendo. Molti dei microrganismi finora utilizzati per la produzione di proteine ricombinanti possono essere infatti somministrati in modo sicuro sia all' uomo che agli animali, essendo componenti usuali della flora batterica fisiologica o essendo privi e/o privati di qualsiasi rischio patogenetico. Altre specie meno convenzionali per la flora batterica fisiologica, già utilizzate per la produzione di proteine ricombi-

nanti, possono essere utilizzate purché soddisfino i requisiti di non patogenicità e capacità di colonizzare mucose umane o animali. Questa tecnologia consentirebbe quindi di affrontare e risolvere specifici problemi terapeutici, selezionando opportunamente e adattando il microrganismo, la proteina da esprimere ed i vettori di espressione, precedentemente utilizzati per la produzione del biofarmaco in ambiente di laboratorio e, successivamente, industriale.

Negli ultimi anni sono state poi sviluppate tecnologie che permettono di produrre biofarmaci e vaccini a subunità a basso costo in cellule vegetali in coltura ed anche in piante intere. Questo nuovo campo delle biotecnologie è stato definito "Molecular farming" ed i relativi prodotti "Plant Made Pharmaceuticals" (PMP). I primi esempi di sintesi di molecole biofarmaceutiche nelle piante risalgono alla fine degli anni '80, quando fu dimostrata la possibilità di produrre anticorpi completi in foglie di tabacco, o albumina sierica umana in piante di tabacco o di patata. Inizialmente, la ricerca in questo specifico settore si è occupata di ottimizzare il sistema di espressione (al fine di incrementare i livelli di produzione) e di selezionare le varietà di piante più efficaci per questo tipo di applicazione. Oggi sappiamo che molte specie vegetali quali pomodoro, erba medica, lattuga, mais, riso, soia, e una specie selvatica affine al tabacco, possono essere utilizzate non solo per la produzione di reagenti, ma anche per la produzione di diverse tipologie di biofarmaci, dagli ormoni alle citochine, dalle proteine multimeriche complesse come gli anticorpi, alle subunità antigeniche in grado di autoassemblarsi.
Si tratta ormai di una tecnologia consolidata, anche in termini di protocolli di estrazione e purificazione del prodotto dai tessuti vegetali (downstream processing) nel rispetto delle regole di "good manufacturing practice" e "good laboratory practice" (rispettivamente GMP e GLP). Tale tecnologia trae ovviamente continuo spunto anche dalle più moderne metodiche di modificazione genetica di precisione, una fra tutte il CRISPR-Cas9 (genome editing).

MOTIVAZIONE PER LO SVILUPPO

Nella crescente domanda di farmaci innovativi che deve soddisfare la necessità di ridurre i costi e ampliare l'accessibilità alle cure, i farmaci biotecnologici ottenuti impiegando le piante come biofabbriche rappresentano una delle risposte più promettenti delle biotecnologie avanzate. L'uso delle biofabbriche vegetali come sistemi per l'espressione di biofarmaci presenta alcuni indiscutibili vantaggi tra i quali: i) sintesi di proteine ricombinanti ad elevata autenticità strutturale; ii) sicurezza intrinseca del prodotto ricombinante per la salute degli animali o dell'uomo; iii) tempi e costi di produzione inferiori rispetto ai bioreattori classici; iv) facile scalabilità. Quest'ultimo punto è di particolare rilevanza ad esempio per la produzione di vaccini in risposta ad una pandemia. In tale situazione è infatti importante poter disporre di sistemi di produzione in grado di soddisfare improvvisi aumenti di richiesta del prodotto in tempi brevi. Di recente, una ditta canadese impegnata nella produzione in pianta di un vaccino a subunità contro l'influenza ha stimato e dimostrato che il sistema di produzione adottato, basato su Nicotiana benthamiana, permetterebbe di fornire il primo lotto di dosi del vaccino dopo solo 3 settimane dalla definizione della sequenza del ceppo influenzale responsabile della pandemia. Un ulteriore vantaggio derivante dalla messa a punto di piante biofabbrica di biofarmaceutici risiede nella possibilità di conservare la pianta ge-

neticamente modificata sottoforma di seme, e non come nel caso delle linee cellulari mediante costosi metodi di crioconservazione. Infine, nel caso di piante commestibili, è possibile prevedere l'assunzione diretta del principio attivo non purificato direttamente tramite la dieta.
Un discorso più approfondito meritano i vaccini, perché se da un lato è possibile esprimere in pianta proteine antigeniche per la formulazione di vaccini ricombinanti a subunità, dall'altro presso i Laboratori di Biotecnologie dell'ENEA sono state messe a punto anche tecnologie per far sì che tali proteine siano "potenziate" nella loro intrinseca capacità di stimolare il sistema immunitario, sfruttando proteine endogene della pianta, ad esempio heat shock proteins ed oleosine, o virus vegetali. A tal proposito, i virus vegetali possono essere impiegati come veicolo della proteina antigenica o come nano-contenitori per la somministrazione di farmaci. In questo modo la pianta non è "solo" una biofabbrica ma migliora le proprietà intrinseche del prodotto finale aumentandone la performance.
Non va infine sottovalutato il fatto che le biotecnologie vegetali (applicate alle "red biotech", quindi alla salute) possono rivestire un ruolo importante anche nella medicina veterinaria, non solo perché la salute degli animali è garanzia della qualità dei prodotti alimentari che da essi derivano, ma anche perché gli animali sono spesso un veicolo di infezioni per l'uomo (zoonosi).
È pertanto un sistema di produzione estremamente versatile, che può essere impiegato sia per i biofarmaceutici con un mercato ristretto (come nel caso delle malattie neglette) o molto specifico e singolare (come nel caso della medicina personalizzata), sia per quelli con un mercato molto ampio (come per gli emoderivati o i microbicidi), o con un mercato molto dinamico che deve rispondere ad improvvisi aumenti di richiesta (come per le pandemie o nel caso di eventi di bioterrorismo).

Come descritto nel paragrafo precedente, una particolare rilevanza va inoltre data anche al microbioma, che sta assumendo un'importanza notevole. L'ampia presenza dei batteri nell'intestino ed in molti altri distretti del corpo umano si sta rivelando una delle più importanti scoperte mediche degli ultimi anni. La ricerca sul microbioma intestinale è ancora all'inizio della sua storia e ci sono ancora concrete possibilità di inserirsi in questo promettente filone di ricerca e contribuire a sviluppare le tecniche necessarie per poter manipolare e veicolare in modo efficace, sicuro ed efficiente i batteri all'interno del corpo umano utilizzandoli come un ulteriore tool nel campo della ricerca farmacologica.
Nella seguente review, "Bioengineered and biohybrid bacteria-based systems for drug delivery" in Advanced Drug Delivery Reviews (2016, Volume 106, Part A, Pages 27-44), sono riportati solo alcuni dei possibili microrganismi, ed i relativi campi di applicazione, in cui i batteri stanno dimostrando un ruolo attivo al mantenimento dello stato di salute dell'individuo, e la ricerca sull'utilizzo del microbioma si apre al miglioramento dei trattamenti medici su un ampio spettro.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

La prima proteina di interesse farmaceutico derivata dalle piante è stata un vaccino veterinario a subunità approvato nel 2012 e cioè più di 20 anni dopo che proteine di interesse farmaceutico erano state espresse per la prima volta in tabacco e patata. Nonostante i vantaggi offerti dal

Molecular farming, le aziende produttrici di biofarmaceutici sono state riluttanti ad adottare questa tecnologia, sia per via dei pregressi investimenti nei classici fermentatori necessari per il mantenimento in coltura dei sistemi di espressione tradizionali, sia per la mancanza di un quadro normativo di riferimento.
Negli anni '90 la tecnologia era stata invece già adottata con entusiasmo da un piccolo numero di aziende per produrre proteine ricombinanti per uso non farmaceutico (la cosiddetta agricoltura molecolare), ad es. reagenti, come avidina e b-glucuronidasi. Può sembrare strano che i prodotti farmaceutici abbiano impiegato più di 15 anni per ottenere lo stesso successo, ma il ritardo registrato dai PMP è principalmente dovuto al fatto che questi devono essere prodotti nel rispetto di linee guida molto rigide, che fino agli anni 2000 non sono state definite con chiarezza. Negli Stati Uniti l'autorizzazione della maggior parte dei farmaci e dei saggi diagnostici è sotto la supervisione della Food and Drugs Administration (FDA) e quella dei vaccini veterinari è affidata al Dipartimento dell'Agricoltura degli Stati Uniti (USDA), che controllano e legiferano "sul prodotto", mentre nell'Unione Europea, le diverse Istituzioni, l'Agenzia europea per i medicinali (EMA) che controlla la parte normativa riguardante i prodotti farmaceutici, e l'Autorità europea per la sicurezza alimentare (EFSA) che valuta gli usi non alimentari delle piante, controllano e legiferano "sul processo di produzione e sul prodotto" e questo fa sì che il Molecular farming sia soggetto a diversi regolamenti, molto complessi e diversi tra loro, oltre che legati anche alle realtà dei singoli paesi.

Nonostante la complessità del sistema normativo però, negli Stati Uniti sono state prese iniziative al fine di favorire il trasferimento a livello industriale della tecnologia. Il Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti ad esempio nel 2009 ha lanciato una sfida agli operatori nel settore del Molecular farming affinchè dimostrassero la competitività della tecnologia nell'ambito della produzione dei vaccini anti-influenzali. Sul tema proposto si sono confrontate diverse organizzazioni, aziende e consorzi. Ad esempio, il Centro Fraunhofer per la Biotecnologia Molecolare ha dimostrato di essere in grado di produrre fino a 200 mg dell'antigene emoagglutinina per kg di foglie fresche di tabacco entro poche settimane dal ricevimento della sequenza del ceppo influenzale bersaglio. Altre realtà private hanno risposto a questa iniziativa, come la Kentucky Bioprocessing e la Medicago USA, che ha beneficiato recentemente di considerevoli investimenti da parte della Società farmaceutica giapponese Mitsubishi Tanabe Pharma Corp. Queste organizzazioni hanno investito somme ingenti nella realizzazione di impianti di produzione GMP, riuscendo a portare vari prodotti a sperimentazioni cliniche di fase 1.
Ciononostante, ad oggi, l'unico prodotto biofarmaceutico di origine vegetale approvato per uso umano è una forma ricombinante della glucocerebrosidasi umana (nota come prGCD, taliglucerase alfa o Elelyso) usata per il trattamento della malattia di Gaucher. Per produrre il farmaco, la ditta Protalix BioTherapeutics (Israele) ha sviluppato una piattaforma basata su cellule di carota.
Più di recente, in occasione dell'epidemia di Ebola del 2014 è stato approvato un cocktail di anticorpi monoclonali contro il virus Ebola, prodotti nelle piante (chiamato ZMapp, prodotto dalla Mapp Biopharmaceutical, Inc.). In questo caso, per via del fatto che l'emergenza sanitaria creatasi in Africa rischiava di raggiungere altri continenti, la FDA ha mostrato una certa flessibilità norma-

tiva consentendo di utilizzare in via sperimentale il preparato su due medici statunitensi che avevano contratto la malattia. Il farmaco, così prodotto per la prima volta, ha dimostrato di possedere una buona efficacia terapeutica contro l'Ebola, rendendo possibile nel prossimo futuro che questo trattamento sperimentale trovi un più ampio sviluppo, anche a livello commerciale.
In campo veterinario, invece, come unico esempio ad oggi, è stato commercializzato nel 2014 l'interferone-alfa canino ricombinante per il trattamento della malattia parodontale nei cani, prodotto da Hokusan Co. Ltd, presso l'Istituto nazionale di scienza industriale avanzata e tecnologia (AIST, Hokkaido, Giappone), in fragole geneticamente modificate e per questo chiamato "Interberry-alfa".

In questo contesto, l'Italia ha un ruolo leader nel settore. In particolare, l'ENEA si è distinta come pioniere nel campo, per aver dimostrato già nel 1993 la possibilità di utilizzare le piante per produrre anticorpi, continuando poi a contribuire allo sviluppo della tecnologia e dimostrando di poterla adattare alla produzione di nuove formulazioni vaccinali, immunocitochine, immunocomplessi, ma anche nanoparticelle di origine virale vegetale per il trasporto e rilascio mirato di farmaci, per la teranostica e lo sviluppo di kit diagnostici, dimostrando le enormi potenzialità di questa tecnologia, sia in campo umano che veterinario. Più di recente, ENEA, nell'ambito di progetti finanziati dall'ASI, l'Agenzia Spaziale Italiana, per sviluppare sistemi per la produzione di biofarmaci in pianta da poter impiegare nelle missioni spaziali, si sta anche interessando alla produzione di biomolecole nell'apparato radicale delle piante in sistemi idroponici, che consentano una più agevole produzione, purificazione ed utilizzo del biofarmaco. Risulta pertanto evidente che i campi di applicazione del Molecular farming e le sue potenzialità si spingono ogni volta oltre lo scenario che si pensa ormai consolidato.
Purtroppo, nonostante siano presenti sul territorio nazionale aziende di medie-piccole dimensioni che mostrano interesse alla tecnologia, si tratta per lo più di piccole realtà, a volte spin-off o start-up, spesso trainate non da un prodotto unico chiaramente definito, ma piuttosto dalla tecnologia della piattaforma adottata. Si tratta quindi di realtà piccole, per le quali il rischio di investimento percepito è indubbiamente maggiore, strettamente correlato anche al clima economico ed al sentimento prevalente del settore degli investimenti privati nei confronti delle biotecnologie.

Per quanto riguarda l'approccio di studio ed utilizzo del microbioma, diverse Società Biotecnologiche in Europa e negli stati uniti stanno sperimentando queste nuove metodologie terapeutiche, utilizzando microrganismi ingegnerizzati.
Ad esempio i ricercatori di Synlogic (USA) hanno selezionato un ceppo innocuo di E. coli, un batterio studiato per anni e presente nell'intestino della maggior parte delle persone. Lo hanno poi modificato per generare un farmaco biotico sintetico chiamato Synb1618. In pratica, i ricercatori di Synlogic hanno inserito alcuni geni nel DNA dei batteri in modo che, una volta arrivati nell'intestino, fossero in grado di degradare la fenilalanina, come fanno le cellule dell'organismo umano. Nel dettaglio, un gene codifica per il sistema di trasporto che i batteri usano per veicolare nel loro citoplasma la fenilalanina che li circonda, mentre un secondo gene codifica un enzima che scompone la fenilalanina in frammenti. I batteri rilasciano poi al loro esterno questi frammenti, che in seguito vengono eliminati con le urine. L'azienda ha appena concluso uno studio clinico in

cui volontari sani hanno assunto diverse dosi del farmaco, per testarne la tollerabilità e la sicurezza. Alla fine della sperimentazione, Synlogic ha annunciato che i soggetti hanno tollerato in sicurezza i batteri modificati. Inoltre, la presenza di fenilalanina nelle urine – tanto maggiore quanto maggiore era la quantità di farmaco assunto – dimostrava che i batteri avevano svolto il proprio compito. Il prossimo passo sarà valutare l'efficacia dei microbi modificati nell'abbassare i livelli di fenilalanina nelle persone affette da fenilchetonuria. Se tutto andasse come ipotizzato, i batteri ingegnerizzati potrebbero dunque diventare un'utile opzione terapeutica per gestire i livelli di fenilalanina nel sangue.

Infine, un consorzio costituito da Porton Biopharm e Scitech (UK) sta sviluppando un sistema di targeting intestinale utilizzando spore derivate da batteri anaerobici (Clostridia) per rilasciare nell'intestino prodotti terapeutici allo scopo di curare patologie infiammatorie come la colite ulcerosa e il morbo di Chron.

Nel panorama italiano, Dompé nel recente passato si era interessata a questo campo di ricerca producendo studi che hanno generato brevetti e pubblicazioni su un possibile utilizzo di microrganismi ricombinanti come sistemi di biodelivery.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

Effettuare una valutazione delle risorse economiche necessarie è cosa molto complessa, soprattutto nel campo del Molecular Farming. Gli studi più approfonditi a questo riguardo sono quelli condotti negli Stati Uniti da un gruppo di ricercatori del settore per confrontare la produzione di anticorpi monoclonali in pianta con quella in cellule CHO in coltura. Il presupposto dello studio è che il trattamento di una malattia come l'HIV prevederebbe la somministrazione di 30 mg di anticorpo al singolo paziente due volte alla settimana per un anno (~ 100 dosi/anno), e che quindi per trattare la popolazione di individui sieropositivi nell'Africa subsahariana (attualmente 26 milioni di persone e la popolazione a rischio è ancora più elevata) una efficace campagna di profilassi richiederebbe 50-100 tonnellate di anticorpo/anno. Tali quantitativi superano di gran lunga le capacità produttive anche dei più grandi fermentatori.

A differenza dei fermentatori, le piante possono essere paragonate a dei bioreattori monouso la cui scala di produzione può essere stabilita a piacimento semplicemente aumentando la superficie coltivata. È stata calcolata una resa in biomassa di 10.000 t/km^2 per anno per il tabacco coltivato in campo aperto e di 182 t utilizzando un impianto di produzione verticale (VFU) di recente costruzione in Germania con una superficie di ~ 2.000 m^2 adibiti esclusivamente alla crescita delle piante. Questo vuol dire che utilizzando il VFU, la produzione annuale di biomassa sarà oltre nove volte superiore rispetto alla produzione in pieno campo (91.000 t/km^2 per anno). Inoltre, le VFU possono essere progettate come impianti completamente automatizzati e soddisfare così i requisiti attuali di cGMP, che mai potranno essere soddisfatti dalle coltivazioni in campo aperto.

Per quanto riguarda i costi, in media per il mantenimento in coltura delle piante si parla di circa 4 milioni e mezzo di dollari, contro i 14-22 milioni di dollari per lotto produttivo di cellule CHO.

Alla luce di questi dati, risulta evidente che la produzione di anticorpi nelle piante è da considerarsi economicamente competitiva con quella nelle cellule CHO. Infatti, anche se l'investimento iniziale per la realizzazione degli impianti di produzione è di entità paragonabile, i costi operativi e

di processamento per il prodotto di origine vegetale sono inferiori, soprattutto grazie al fatto che le tecniche colturali delle piante sono molto semplici e non richiedono condizioni di sterilità.
Per il potenziamento e lo sviluppo delle tecnologie riguardanti l'uso biotecnologico del microbioma umano e per la maggiore integrazione in una rete omogenea e completa, sono invece necessari degli investimenti importanti per rispondere alla richiesta della ricerca in un settore che richiede grandi competenze scientifiche e importanti risorse strumentali. Basandosi su queste considerazioni sarebbe auspicabile un finanziamento pubblico-privato di 40-50 milioni di euro.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 5

IMAGING MOLECOLARE

L'imaging in vivo è un insieme di procedure diagnostiche (ad es. radiografia, TAC, risonanza magnetica, ecografia, ecc.) che consentono di visualizzare dettagli interni dell'organismo (imaging morfologico) e talvolta anche di trarre informazioni su determinate funzioni e processi (imaging funzionale).

L'imaging molecolare si realizza quando ad una procedura di imaging come sopra descritto si associa un composto in grado di concentrarsi preferibilmente in corrispondenza di uno specifico bersaglio molecolare, caratteristico di una certa patologia. Questi composti, definiti anche sonde diagnostiche, consentono quindi di identificare organi e tessuti affetti da una specifica patologia. Ogni sonda diagnostica è destinata ad un'applicazione specifica, sia per la tecnologia di imaging impiegata, sia per l'alterazione fisiologica in esame. Lo sviluppo di tali sonde richiede un approccio multidisciplinare, basato su chimica, biologia molecolare e cellulare, proteomica, genomica, fisica declinate anche attraverso tecnologie particolarmente trasversali quali micro e nanotecnologie ed informatica. Basilare è la conoscenza della fisiologia e dell'anatomia patologica con particolare riferimento ai fenomeni metabolici associati.

L'imaging multimodale, unendo due o più modalità tecnologiche, consente l'integrazione dei punti di forza delle singole modalità di imaging, superandone i singoli limiti. Le comuni modalità: CT, PET, SPECT, MRI, Optical Imaging, infatti hanno diverse peculiarità.

Si parla di imaging anatomico, quando ci si basa su meccanismi diversi di contrasto dei tessuti, favorendo la visualizzazione 3D delle strutture anatomiche (CT e MRI); l'imaging funzionale grazie alla sensibilità specifica di particolari sonde, permette invece di differenziare i tessuti in base ai processi biologici che avvengono in essi e le particolari patologie. Incorporando in un sistema multimodale l'imaging anatomico e funzionale, si ottiene un sistema sinergico che rende possibile visualizzare e delineare nel dettaglio le informazioni strutturali e funzionali. La multimodalità permette altresì di ottenere un panorama più chiaro dei meccanismi fisiologici a livello molecolare e cellulare, a vantaggio di una diagnosi e di piani terapeutici migliori.

Un'altra importante applicazione nell'integrazione di più tecniche di immagine, la si ha nella ricerca preclinica per lo sviluppo di modelli animali, il cui il risultato è fondamentale per colmare il divario traslazionale con le applicazioni cliniche. Si deve poi distinguere tra l'imaging multimodale sequenziale e simultaneo. Nel primo, le immagini vengono acquisite in momenti diversi ed integrate successivamente; nella modalità simultanea vengono acquisite in un'unica sessione ed analizzate in contemporanea. Sistemi ibridi PET/SPECT e PET/CT vengono ormai impiegati di routine nella diagnostica clinica.

Recentemente, si sta sviluppando attraverso la sperimentazione pre-clinica, la combinazione

PET/MRI e SPECT/MRI. La metodica oltre a fornire una combinazione tra imaging strutturale e funzionale, unisce la maggiore sensibilità della PET/ SPECT in ambito funzionale, alla più alta risoluzione spaziale della risonanza magnetica in ambito anatomico. Esistono anche sistemi multimodali che sfruttano sonde a bioluminescenza e fluorescenza (Imaging Ottico) in sinergia con la CT ed in alcuni casi la PET e la SPECT. Allo stato attuale queste metodologie vengono impiegate solo nel pre-clinico con lo scopo di supportare lo sviluppo di nuovi mezzi di contrasto o studiare nuovi modelli animali.
In questo ambito nuove potenzialità sono offerte dalla microCT in contrasto di fase, ottenibile utilizzando sorgenti di raggi X con adeguate caratteristiche di coerenza spaziale (sincrotroni, sorgenti Compton e sistemi microCT convenzionali di ultima generazione). Rispetto all'imaging a raggi X convenzionale in assorbimento, la tecnica del contrasto di fase permette un sostanziale aumento di sensibilità ed un miglioramento della qualità delle immagini a parità di dose assorbita. Nella sperimentazione pre-clinica, questa tecnica può essere abbinata all'imaging MRI e ottico.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Le procedure di imaging hanno ormai assunto un ruolo centrale nella pratica medica, in quanto permettono al medico di avere piena consapevolezza della localizzazione ed estensione della patologia, anche quando la diagnosi è basata su altri elementi. Si può quindi affermare che sempre più l'imaging sta superando i confini della pura diagnostica, per assumere un ruolo di sostegno a numerose pratiche cliniche, quali:

- interventi chirurgici
- biopsie guidate
- selezione e monitoraggio delle terapie
- verifica somministrazione dei farmaci.

L'imaging molecolare basato su mezzi di contrasto o sonde diagnostiche dotate di elevata specificità consente di progettare e realizzare approcci terapeutici innovativi, sempre più orientati allo specifico paziente, in un'ottica di medicina personalizzata, sempre più efficace e con minori effetti collaterali.
Si comprende quindi come tale tecnologia risulti prioritaria, in quanto sviluppo dell'imaging tradizionale, che ha contribuito in maniera determinante al miglioramento della qualità della vita ed alla razionalizzazione della spesa sanitaria. Se da una parte devono essere costantemente applicate e migliorate le procedure di screening nella popolazione asintomatica, una recente linea guida della Organizzazione Mondiale della Sanità (WHO - Guide to cancer early diagnosis, 2017) ha messo in luce come la diagnosi precoce in soggetti che manifestano i primi sintomi di malattia sia la chiave che permette di migliorare la qualità ed aspettativa di vita dei pazienti, oltre che incidere positivamente sulla spesa sanitaria.
Le tecniche di imaging molecolare rappresentano l'evoluzione delle attuali tecniche di imaging e consentono di accedere ai trattamenti di medicina personalizzata, sempre più selettivi ed efficaci. L'imaging molecolare, unito anche ai nuovi metodi di diagnosi in vitro, consente di selezionare ed indirizzare tali trattamenti, oltre a monitorarne l'efficacia.

Mentre le modalità di imaging tradizionale possono essere utilizzate anche senza mezzo di contrasto (ad esclusione delle tecniche di medicina nucleare, quali PET e SPECT), l'imaging molecolare si caratterizza per il fatto di dover dipendere da sonde specifiche, che, operando a livello cellulare e molecolare, trasmettono informazioni diagnostiche al sistema di acquisizione. L'utilizzo di tali sonde già permette, e sempre più permetterà, di entrare nello specifico dei processi della vita cellulare, evidenziandone le alterazioni patologiche anche attraverso un sempre più specifico riconoscimento del metabolismo associato.

Per quanto riguarda i sistemi ibridi, la PET-MRI rappresenta un importante passo avanti nella tecnologia di imaging multimodale, poiché ha il potenziale per far progredire in modo significativo i paradigmi di imaging diagnostico nella clinica. L'imaging ibrido PET-MRI attraverso la sua capacità di investigare i processi molecolari può avere, infatti applicazioni ad ampio raggio. Rilevare l'espressione di specifici recettori e proteine multiresistenti così come identificare vari marcatori dei processi cellulari, come l'ipossia, l'angiogenesi e il metabolismo, può fornire informazioni vitali per migliorare l'accuratezza diagnostica in oncologia, imaging cardiovascolare e neurologia. L'imaging multimodale con PET-MRI è estremamente efficace nella caratterizzazione dei tessuti molli, pertanto si configura come lo strumento che può significativamente migliorare la valutazione dei disturbi del Sistema Nervoso Centrale, grazie ad una migliore caratterizzazione delle lesioni cerebrali. Queste informazioni potrebbero essere utili per la diagnosi e il trattamento di patologie quali convulsioni, morbo di Alzheimer e Parkinson, trauma cranico e tumori cerebrali. Con la tecnica PET-MRI, la valutazione della farmacocinetica e del metabolismo dei farmaci può essere eseguita in modo non invasivo utilizzando l'imaging dinamico con radiotraccianti e agenti di contrasto MRI. Inoltre, l'imaging ibrido simultaneo PET-MRI può aiutare a ridurre gli errori di co-registrazione, ridurre il tempo complessivo di scansione del paziente ed evitare sedute multiple di anestesia.

Lo sviluppo di un sistema di imaging ibrido SPECT-MRI è particolarmente interessante per i numerosi vantaggi associati all'uso di radionuclidi SPECT prodotti da generatore. L'emivita più lunga della maggior parte dei radionuclidi SPECT li rende più facilmente gestibili per l'incorporazione in biosonde di imaging molecolare. Inoltre, i radioisotopi SPECT come 111In (emivita: 2,8 giorni) sono adatti anche per l'imaging di siti extravascolari (tumori) che richiedono agenti di imaging che possono circolare nel sangue per un tempo più lungo. Inoltre, le sonde molecolari basate su SPECT sono generalmente meno costose rispetto ai radionuclidi PET prodotti da ciclotrone. La SPECT è anche vantaggiosa per la sua capacità di visualizzare simultaneamente diversi radioisotopi utilizzando rivelatori ad alta risoluzione, consentendo in tal modo un'indagine simultanea di biomarcatori aggiuntivi. Queste procedure stanno riscontrando enorme interesse nel campo della teranostica: la capacità cioè di svolgere diagnosi e nello stesso tempo terapia. Grazie ad un numero sempre più elevato di traccianti radioattivi e nanoparticelle, sarà possibile in futuro non molto lontano, la personalizzazione delle cure con diagnosi e terapia in contemporanea.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Non tutte le modalità diagnostiche attualmente in clinica hanno i prerequisiti per essere considerate idonee all'imaging molecolare.

L'imaging clinico con Raggi X (CT) richiederebbe un aumento della sensibilità oggi ancora non ottenibile, mentre stanno comparendo applicazioni di notevole importanza a livello preclinico. In questo ambito recenti studi di microtomografia con luce di sincrotrone condotti su piccoli animali hanno dimostrato la potenzialità delle tecniche radiografiche di contrasto di fase per lo sviluppo di protocolli che combinano l'imaging morfologico e quello funzionale ad alta risoluzione. A titolo di esempio si possono citare le tecniche di cell-tracking messe a punto per seguire l'evoluzione dei tumori cerebrali in un modello animale di ratto o per visualizzare l'infiammazione sui polmoni di topi asmatici.

L'imaging con Risonanza Magnetica potrebbe essere applicato solo nella particolare modalità dell'imaging metabolico con substrati iperpolarizzati. In quest'ambito siamo ancora alle fasi di ricerca, che vedono coinvolte alcune significative realtà italiane, sia industriali sia accademiche, all'interno di progetti e reti internazionali.

L'imaging nucleare è invece quello dove le applicazioni dell'imaging molecolare sono già in clinica, soprattutto nelle modalità della PET e SPECT con traccianti specifici, in grado di riconoscere particolari recettori sulle cellule tumorali o di evidenziare alcune caratteristiche del loro metabolismo. Per la PET il tracciante di gran lunga più utilizzato è il [18F] Fluoro-Deossiglucosio (FDG), che è in grado di evidenziare la maggior parte dei tumori, ma altre molecole stano diventando di uso sempre più diffuso, grazie alla loro migliore selettività. Così ad esempio la [18F] L-Timidina (FLT), utile nella individuazione di tumori in rapido accrescimento; il [18F] misonidazolo (MISO), che si accumula nei tessuti carenti di ossigeno segnalando la loro probabile resistenza ai trattamenti radioterapici; la [18F]-diidrossi-fenilalanina (18F-DOPA) e la [18F] fluoroetil-tirosina (ET) utili nelle patologie cerebrali.

L'ecografia con mezzo di contrasto sta conquistando ampi spazi a livello clinico e, grazie all'elevata sensibilità, giocherà un ruolo importante anche nell'imaging molecolare, soprattutto per patologie intravascolari. Sono in fase di sperimentazione clinica avanzata alcuni mezzi di contrasto per "ecografia molecolare", nei quali proteine o peptidi dotati di una specifica capacità di legame con un recettore sono immobilizzati sulla superficie delle microbolle che servono come agenti di contrasto. L'elevata sensibilità propria del mezzo di contrasto ecografico, unità alla grande specificità della sua componente biologica lasciano ipotizzare nuove applicazioni diagnostiche nelle quali si possono ottenere informazioni sulle caratteristiche molecolari di una patologia, senza il ricorso a sostanze radioattive.

Anche l'imaging ottico, in particolare nelle frequenze del vicino infrarosso (NIR), rappresenta una nuova frontiera dell'imaging molecolare senza radiazioni ionizzanti. Data la bassa capacità di penetrazione della luce nei tessuti umani, le prime applicazioni riguarderanno soprattutto lesioni superficiali oppure come ausilio intraoperatorio, per consentire al chirurgo una visione che distingue i tessuti patologici da quelli sani. In quest'ultimo ambito sono in corso numerosi studi clinici per valutare se il miglioramento delle condizioni di intervento si traduce effettivamente in una riduzione delle necessità di secondo intervento e nell' aumento della speranza di vita. A differenza delle altre tecniche maggiori di imaging diagnostico viste sinora, per l'imaging ottico nel vicino infrarosso non esistono macchine cliniche dalle caratteristiche standardizzate, per cui è necessario affiancare allo sviluppo delle sonde fluorescenti anche la messa a punto di telecamere e sistemi

di acquisizione in grado di fornire al chirurgo in tempo reale una immagine fedele della zona sottoposta ad intervento, evidenziando le regioni di accumulo della sonda fluorescente.
A livello accademico sono numerosi i gruppi che utilizzano l'imaging molecolare in vivo e ne sviluppano il potenziale, soprattutto a livello preclinico. Oltre a riconoscere l'insorgere e lo sviluppo di patologie su modelli animali, è possibile utilizzare tali modelli per verificare l'efficacia dei farmaci innovativi.
Già si assiste, nell'ambito dello sviluppo di nuovi farmaci, al sempre maggiore impiego dei cosiddetti "Diagnostic Companion", spesso sviluppati da piccole imprese limitatamente all'uso in vitro. Si tratta di reagenti che consentono di individuare nei campioni prelevati dal paziente la presenza o meno di quelle caratteristiche che rendono utile un certo trattamento terapeutico. È chiaro che in termini di costi il test in vitro è decisamente più competitivo rispetto un test in vivo, tuttavia l'informazione, "l'immagine" acquisita in vivo ha un valore per il medico spesso di gran lunga più rilevante. In alcuni casi, come quello di biomarcatori non circolanti, diventa l'unica opzione possibile, a meno di ricorrere ad invasivi prelievi bioptici.
In maniera abbastanza inattesa, quindi, proprio l'elevato costo delle nuove terapie sta facilitando l'introduzione di nuove tecnologie diagnostiche, quali appunto quelle dell'imaging molecolare. Grazie a queste, infatti, è e diverrà sempre più possibile individuare con esattezza i pazienti in grado di beneficiare di una certa terapia (medicina personalizzata), evitando di utilizzarla invece per coloro che con molta probabilità non ne sarebbero avvantaggiati ed indirizzandoli verso altri approcci terapeutici. In questo scenario, il costo di una tecnologia diagnostica supplementare sarebbe ampiamente compensato dai risparmi derivanti dal fatto di poter selezionare i pazienti a cui somministrare una certa terapia, aumentandone così decisamente l'efficacia. In tali casi, la procedura di imaging molecolare potrebbe diventare il complemento necessario alla terapia, in quanto non rappresenterebbe un costo aggiuntivo, ma anzi permetterebbe una gestione più corretta del paziente, con grandi benefici sia per l'efficacia della terapia, sia per i costi del trattamento.
Parallelamente, esistono già esempi applicativi di tecnologie di imaging molecolare applicate durante gli interventi chirurgici (imaging intraoperatorio), condotti anche con tecniche chirurgiche mini-invasive. Grazie a queste tecnologie, il chirurgo può vedere su uno schermo che i tessuti patologici assumono una colorazione diversa perché captano selettivamente una sonda per l'imaging molecolare in fluorescenza (o imaging ottico), ed è così molto facilitato nell'intervento di asportazione del tessuto tumorale o dei linfonodi a questo collegati. La chirurgia guidata dall'imaging ottico sta rapidamente sviluppandosi, grazie anche alla commercializzazione di telecamere sempre più sensibili e versatili, che consentono al chirurgo di passare agevolmente dalla visione normale (luce bianca) a quella in fluorescenza. Una primaria società farmaceutica italiana ha investito con convinzione in questo tipo di applicazione ed è quindi probabile che in Italia si possano sviluppare centri di eccellenza nell'uso di procedure chirurgiche guidate dall'imaging molecolare con sonde fluorescenti. Casi recenti dimostrano che tali tecnologie riducono la frequenza di nuovi interventi, spesso resi necessari dall'incompleta asportazione del tessuto patologico nel primo intervento.
Il potenziale applicativo dell'imaging multimodale PET-MRI e SPECT-MRI, dovuto al potenziale incremento di accuratezza diagnostica, ha aumentato di molto l'interesse verso queste tecniche.

Tuttavia, lo sviluppo di scanner multimodali, necessita ancora di un certo sviluppo tecnologico. In particolar modo le difficoltà sono legate all'utilizzo del campo magnetico della risonanza magnetica accoppiata a componenti elettroniche e rivelatori della PET / SPECT. Queste difficoltà aumentano di molto i costi delle macchine, rendendone per il momento impossibile la diffusione, anche se dal punto di vista tecnico, come dimostrato dalle applicazioni pre-cliniche, questi sistemi stanno già dimostrando le grandi potenzialità.
In Italia la ricerca è attiva sia nello sviluppo di nuove tecnologie, soprattutto a livello di istituti di ricerca nazionali, che per quanto riguarda l'applicazione nella ricerca farmacologica e quindi preclinica e propedeutica alla traslazione al mondo clinico. Resta tuttavia da sottolineare che nonostante gli ingenti investimenti nello sviluppo di farmaci, il tasso complessivo di successo dei farmaci durante lo sviluppo clinico rimane lento. La motivazione principale è probabilmente da ricercarsi nel fatto che è necessaria una ricerca preclinica in grado di perfezionare l'uso di modelli animali adatti. Maggiori saranno gli investimenti nell'ambito preclinico, maggiore sarà la probabilità di successo per ottenere modelli animale convalidati e più predittivi, per una migliore traslazione nelle procedure cliniche.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 6

NANOMEDICINA

Il termine Nanomedicina identifica un settore biotecnologico in forte espansione che, tramite l'applicazione delle conoscenze e tecnologie dei materiali su scala nanometrica (10-9 nm), si pone come obiettivo lo sviluppo di strategie innovative sempre più mirate ed efficaci per la prevenzione, la diagnosi e la terapia di diverse patologie. Le caratteristiche peculiari dei nanomateriali ne identificano le loro proprietà e modalità di interazione coi sistemi biologici rispetto ai sistemi terapeutici tradizionali. Tipicamente i materiali di dimensioni nanometriche, grazie ad un elevato rapporto superficie-volume, mostrano proprietà di superficie tali che divengono un parametro intrinseco della loro potenziale bioattività.

Tra i settori terapeutici che maggiormente beneficiano delle applicazioni dei nanomateriali vi sono l'immuno-oncologia, il drug e gene delivery, le neuroscienze, il settore cardiovascolare. In aggiunta altri settori delle scienze della vita, complementari al settore farmaceutico, stanno adottando i nanomateriali per l'implementazione di nuove apparecchiature biomediche, di impianti e protesi e di agenti diagnostici e teranostici.

Diverse tipologie di nanosistemi, tra cui le nanoparticelle, i liposomi, le micelle ed i nanocristalli, definiti anche nanofarmaci, sono impiegati in ambito farmaceutico per migliorare la solubilità dei principi attivi, per favorirne il trasporto ed il direzionamento verso organi o tessuti bersaglio e per attuare un controllo (ritardato o prolungato) del loro rilascio nel tempo. A seconda della loro dimensione, i nanofarmaci possono superare diverse barriere biologiche e tipicamente, per migliorare la loro biocompatibilità e selettività, presentano delle superfici decorate rispettivamente con materiali polimerici [(es. poli(etilen glicol) o molecole direzionanti di natura biologica (es: anticorpi, acido folico, transferrina etc.)]. I nanofarmaci permettono quindi una migliore biodisponibilità dei principi attivi, un maggior controllo della farmacocinetica a favore di una elevata efficacia e maggiore sicurezza dei protocolli terapeutici.

La nanomedicina dunque è oggi alla base dello sviluppo di nuove terapie con principi attivi biologici (biofarmaceutici), delle terapie personalizzate e delle applicazioni teranostiche (diagnosi-terapia) in cui l'impiego di nanosistemi smart multifunzionali consente una diagnosi precoce in vivo associata ad una simultanea terapia mirata e circoscritta al tessuto patologico.

Tutto questo determina un impatto evidente sui tempi di diagnosi e quindi sul miglioramento della prognosi del paziente, gettando le basi della medicina personalizzata. Il principale campo di applicazione della nanomedicina è certamente quello oncologico, ma è in significativo aumento la sua applicazione allo sviluppo di trattamenti per patologie degenerative, infiammatorie e di natura infettiva. In particolare, negli ultimi anni si è assistito da un crescente interesse verso l'impiego della nanomedicina per lo sviluppo di nuove terapie per patologie antibiotico-resistenti, che sono

ormai un'emergenza sanitaria a livello mondiale. Nell'ambito delle applicazioni di imaging per la diagnostica in vivo, i nanosistemi permettono di veicolare sugli organi bersaglio un elevato numero di unità emittenti segnale, ovviando così al problema della bassa sensibilità, tipico delle applicazioni di imaging molecolare. Per garantire una completa eliminazione successivamente alla procedura diagnostica, si sono mostrate utili le nanoparticelle lipidiche solide (SLN), il cui nucleo lipidico permette di inglobare in maniera reversibile le unità molecolari portatrici di segnale. Infatti, altri tipi di nano- o micro-sistemi finiscono per essere catturati dai macrofagi e rimangono intrappolati nel sistema reticoloendoteliale (RES), accumulandosi soprattutto nel fegato e nella milza. Tali problemi non sono invece osservabili con un altro tipo di microsistema, che infatti è alla base di prodotti già approvati e commercializzati. Si tratta delle microbolle in uso come mezzo di contrasto per ecografia. Tali microbolle sono costituite da un guscio stabilizzato di componenti inerti, all'interno del quale è presente un gas, altrettanto inerte. La stabilità di tali microbolle nel circolo sanguigno e la presenza del gas al loro interno (può anche essere semplicemente aria) consentono loro di essere visualizzate con grande sensibilità mediante varie tecniche ecografiche. Ulteriori e recenti sviluppi delle tecniche di preparazione di tali microbolle consentono di immobilizzare nel guscio degli elementi di riconoscimento quali peptidi o frammenti di anticorpi, che sono in grado di direzionare e temporaneamente bloccare le microbolle su particolari organi o tessuti bersaglio. Tale approccio consente di ottenere un imaging molecolare tramite ecografia, cioè tramite la tecnica di imaging più diffusa e meno costosa. Gli studi clinici attualmente in corso confermano che tali mezzi di contrasto consentono la diagnosi molecolare di alcuni tumori, mentre altri riguardano patologie non tumorali, come quelle a base infiammatoria.

Lo studio e la messa a punto dei nanosistemi necessita di tecnologie e protocolli anch'essi innovativi che richiedono sempre maggiore interdisciplinarietà tra diversi settori di ricerca e di sviluppo spaziando dalla fisica, alla chimica e la biologia per arrivare alla medicina. Un ruolo di rilievo lo stanno mostrando le infrastrutture di ricerca nazionali ed internazionali che danno accesso a tecnologie e strumentazioni avanzate per indagini chimiche e microscopiche a livello nanometrico. Un esempio di facility è Elettra Sincrotrone Trieste S.C.p.A di interesse nazionale che gestisce due avanzate sorgenti di luce (il sincrotrone Elettra e il Laser ad elettroni liberi FERMI) e fornisce tecnologia e know-how per indagini su nanosistemi. In particolare nelle indagini precliniche e in abbinamento alle tecniche convenzionali, le spettromicroscopie label-free a raggi X o all'infrarosso con luce di sincrotrone si stanno rivelando particolarmente innovative, perché consentono di monitorare il targeting, gli effetti biologici e i cambiamenti chimici del campione e dei nanosistemi con risoluzioni spaziali e quantitative uniche.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

La nanomedicina, che riveste sempre più un ruolo chiave nello sviluppo di nuove terapie personalizzate, è uno dei settori maggiormente in espansione.

Studi recenti [1, 2] hanno evidenziato che in Europa sono oltre 500 le piccole e medie aziende biotecnologiche, farmaceutiche e chimiche coinvolte nello sviluppo del settore nanomedicina e che i nanofarmaci presenti sul mercato sono circa 50 con un valore totale del comparto di oltre 120 miliardi di fatturato. Inoltre è importante sottolineare che a fronte degli oltre 200 nanofarmaci

attualmente testati sull'uomo, oltre il 30% sono per la terapia dei tumori.
I vantaggi, in ambito farmaceutico, legati allo sviluppo della nanomedicina sono molteplici e, tra questi, in particolare l'ottimizzazione di una nanomedicina di precisione è uno dei maggiori stimoli allo sviluppo delle realtà operanti nel settore delle nanotecnologie per la medicina.
Tra le motivazioni più importanti che supportano lo sviluppo della nanomedicina vi sono certamente quelle fornite dalla nuova agenda strategica 2016-2030 per la ricerca e l'innovazione in nanomedicina (SRIA) pubblicata sulla European Technology Platform on Nanomedicine (ETPN). Tra queste, viene evidenziata la necessità di focalizzare la ricerca nei settori medici che impiegano terapie ancora non del tutto soddisfacenti, fornendo opzioni terapeutiche e diagnostiche oggi mancanti. Questo naturalmente sposta l'attenzione verso patologie che affliggono una vasta percentuale della popolazione mondiale e che comprendono le malattie cardiovascolari e tumorali, le patologie neurodegenerative e quelle di natura infettiva e metabolica (es. diabete).
Il supporto ad una ricerca di tipo traslazionale rappresenta un tema fondamentale per lo sviluppo di una nanomedicina che sia effettiva nel traghettare le scoperte scientifiche dal laboratorio a prodotti certificati ed approvati disponibili per i pazienti. Per il raggiungimento di questo obiettivo, un ruolo fondamentale è svolto dalla combinazione delle nanotecnologie con altre tecnologie abilitanti (key enabling technologies – KET) che dovrebbero consentire lo sviluppo di dispositivi "intelligenti" e connessi [3].
Infine, un ulteriore aspetto rilevante per il futuro della nanomedicina richiede di focalizzare l'attenzione su applicazioni che siano sostenibili anche dal punto di vista dello sviluppo regolatorio. Entrano in tal senso a far parte della nanomedicina anche le valutazioni nanotossicologiche per la sicurezza terapeutica dei nanosistemi. Anche se la composizione dei nanofarmaci e dei nanosistemi in genere è considerata non tossica, le interazioni biologiche derivanti dalle caratteristiche fisico-chimiche che rendono smart i nanomateriali sono ancora poco prevedibili e potrebbero rappresentare un rischio per il paziente, soprattutto nel caso di categorie sensibili quali anziani e bambini, nonché per l'ambiente. La nanomedicina non può quindi prescindere da un'attenta valutazione tossicologica dei nanomateriali, nanofarmaci e altri nanosistemi, seguendo le direttive regolatorie europee.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA ED ALL'ESTERO

Negli ultimi due decenni, il costante sviluppo delle conoscenze e delle tecniche per la manipolazione dei materiali su scala nanometrica ha indirizzato la ricerca biomedica verso la messa a punto di nuovi farmaci e terapie basate sull'impiego di nanomateriali. Tale approccio, oggi definito come nanomedicina, rappresenta uno dei maggiori successi applicativi delle nanotecnologie. Gli ambiti in cui la nanomedicina ha registrato i maggiori successi a livello di ricerca e sviluppo includono il drug delivery, l'imaging in vivo, la diagnostica in vitro, i biomateriali e gli impianti bioattivi.
Le recenti indagini e previsioni di mercato, redatte da BCC Research [4], per i prodotti nanotecnologici del settore biomedico/farmaceutico confermano il trend positivo degli ultimi anni. In particolare l'analisi del mercato globale delle nanotecnologie biomediche e della nanomedicina riporta un valore di $134.4 miliardi nel 2016 con la previsione di raggiungere i $293.1 miliardi nel 2022 ad un tasso di crescita annuo nel quinquennio 2017-2022 del 14%. Sempre nello stesso periodo il

segmento dei nanofarmaci antitumorali è previsto crescere con un tasso annuale del 12.3% passando da $47.3 miliardi del 2017 a $ 84.4 miliardi nel 2022; il mercato dei nanofarmaci per le patologie a carico del sistema nervoso centrale, che ha raggiunto nel 2017 $32.9 miliardi dovrebbe crescere con un tasso del 18.2% raggiungendo i $76.0 miliardi nel 2022.
Tale scenario, che fa riferimento a prodotti già in commercio o in pipeline per le maggiori ditte farmaceutiche, tiene conto anche della sempre crescente consapevolezza in termini di salute per le classi medie emergenti in paesi quali l'India e la Cina.
In Italia nel corso degli ultimi anni si è assistito ad un costante aumento dell'interesse, sia pubblico che privato, alle attività di ricerca e sviluppo nel settore della nanomedicina. In particolare la sinergia tra i maggiori centri di ricerca ed università, i grandi gruppi industriali e le PMI ha portato allo sviluppo di distretti tecnologici operanti nel settore delle nanotecnologie biomediche ed a centri di riferimento universitari. Tra questi uno di recente costituzione (inaugurato nel giugno 2017) è il NanoMedLab del politecnico di Milano, che mira a diventare il punto di riferimento in Lombardia per la progettazione e la sintesi di nanostrutture per una sempre più efficiente diagnosi e terapia mirata di diverse patologie.
Per quanto riguarda il settore dell'imaging in vivo e le applicazioni dei mezzi di contrasto per ecografia (microbolle), in Italia è presente la società leader a livello mondiale in questo settore. Vari progetti di ricerca sono in corso su scala internazionale, anche se purtroppo la partecipazione di gruppi italiani è limitata dalla mancanza di risorse e dalla frammentazione delle strutture sanitarie, che non consente di ottenere tassi di arruolamento di pazienti per gli studi clinici equivalenti a quelli di altri Paesi.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

L'unione europea (UE), nel periodo 2008-2014, ha finanziato oltre 50 progetti di nanomedicina che riguardano la messa a punto di nuovi nanovettori per la somministrazione dei farmaci, la medicina rigenerativa e lo sviluppo di nanoparticelle per una diagnostica precoce sempre più efficace. Attualmente con il programma ERA-NET EuroNanoMed III (2016-2021) la UE si prefigge di sostenere attività di ricerca trans-nazionali nel campo della nanomedicina incentrate sulla trasformazione di risultati di progetto in applicazioni cliniche e sui reali bisogni del settore industriale.
Sarebbe dunque importante anche in Italia sostenere la partecipazione a tali bandi con la formazione di figure con competenze manageriali e conoscenze dei meccanismi europei che possano affiancare e supportare i ricercatori nella presentazione di proposte di successo nell'ambito della nanomedicina traslazionale.

BIBLIOGRAFIA

[1]Trends in Nanomedicine, Frost & Sullivan, TechVision, Dec 2015.
[2]Nova24Tech, I numeri della nanomedicina, 2 Febbraio 2016.
[3]Nanomedicine SRIA 2016-2030, ETP Nanomedicine, January 2016.
[4]Nanotechnology in Medical Applications: The Global Market. BCC Research report overview; November 2017.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 7

DISPOSITIVI MEDICI E TECNOLOGIE MINI-INVASIVE

È ormai un dato di fatto che la vita media si sta allungando sempre di più e che i sistemi sanitari italiano, europeo e mondiale nella prossima decade dovranno confrontarsi con l'aumento delle patologie correlate a tale cambiamento demografico. L'obiettivo è non solo quello "prolungare la vita" ma soprattutto di "migliorare la qualità di vita" dei pazienti. Per raggiungere questo obiettivo ci possiamo avvalere oggigiorno di una serie di tecnologie disponibili e molte altre verranno sicuramente sviluppate in un futuro anche prossimo.

L'applicazione dei Sistemi Micro-Elettro-Meccanici (MEMS) in campo medico, si è diffusa con la richiesta crescente di tecniche mini-invasive. Tra i dispositivi MEMS in medicina oltre a quelli diagnostici (Lab-On-Chip, μTAS), terapeutici (drug delivery, drug discovery, drug screaning), di ingegneria tissutale (organi e ossa artificiali, protesi neuronali) si annoverano i dispositivi MIS che includono sistemi mini-invasivi, principalmente chirurgici ma anche terapeutici ed endoscopici.

Con chirurgia mini-invasiva (MIS – Minimally Invasive Surgery o "key-hole Surgery") di intende un insieme di tecniche anestesiologiche, chirurgiche (sempre più video-guidate) ed assistenza post-operatoria, che permettono (grazie alle nuove tecnologie) la riduzione del disagio dei pazienti consentendone una rapida ripresa delle attività.

Anche se sono ormai passati più di 30 anni dal primo intervento in MIS, la chirurgia mini-invasiva è un settore sempre più in fermento grazie al fatto che da una parte i chirurghi chiedono alle Imprese nuovi strumenti per rendere più rapido, meno doloroso e molto più preciso l'intervento e dall'altra le Aziende propongono sempre più spesso nuovi strumenti e dispositivi medici per MIS che permettano loro di ritagliarsi delle nuove quote di mercato.

Pertanto, con "tecnologie mini-invasive" vengono raggruppate tutte le tecnologie (inclusa la robotica) necessarie per lo sviluppo di materiali e delivery system (sistemi che permettono il posizionamento di dispositivi medici) utilizzati per la chirurgia mini-invasiva. Una procedura mini-invasiva è praticamente sempre resa possibile dall'utilizzo di specifici dispositivi medici, sviluppati ed approvati per la procedura stessa. Tali dispositivi possono essere rappresentati da strumenti ed apparecchiature, oppure da oggetti che vengono impiantati nel paziente, dai materiali di consumo utilizzati nella procedura, da particolari sostanze o formulazioni che facilitano o rendono più efficace la procedura, oppure anche da rivelatori e software che permettono di seguire e valutare gli esiti della stessa.

MOTIVAZIONE PER LO SVILUPPO

Si può prevedere che il mercato globale per la chirurgia mini-invasiva si espanderà notevolmente a seguito di diversi fattori coesistenti:

- l'aumento degli interventi chirurgici a seguito dell'invecchiamento della popolazione ed alla crescita delle patologie correlate;
- l'esecuzione di interventi chirurgici convenzionali su pazienti anziani può essere ad alto rischio a causa delle loro, spesso già compromesse, condizioni di salute (patologie concomitanti) ed alla loro lenta e difficoltosa ripresa dopo l'intervento debilitante;
- la richiesta da parte dei pazienti di migliorare la loro "qualità di vita" (una piccola incisione richiederà meno tempo per guarire e sarà molto meno dolorosa);
- il costante sviluppo di nuove tecnologie, materiali e tecniche di imaging che rendono possibili interventi anche su pazienti inoperabili con la chirurgia convenzionale;
- l'alto grado di precisione degli interventi MIS rispetto ai tradizionali grazie alle attrezzature "video-assistite" che permettono di ottenere delle immagini nitide, ingrandite e spesso in 3D degli organi/parti del corpo che si stanno operando;
- la crescente consapevolezza dell'esistenza di chirurgie poco invasive e l'inclinazione delle "nuove leve" di chirurghi ad utilizzare tecniche MIS (inclusi ausili robotici) al posto di quelle convenzionali/standard;
- l'aumento della spesa sanitaria e la conseguente richiesta di ridurre costi e tempi di degenza.

Ma tale espansione potrebbe essere ritardata/diminuita dalla difficoltà ad ottenere i rimborsi dai Sistemi Sanitari dei singoli Paesi in caso di utilizzo di dispositivi inediti o tecniche di impianto MIS.

Globalmente, il mercato degli strumenti per la chirurgia mini-invasiva è stato valutato in 29,4 miliardi di dollari nel 2016, e ci si aspetta una crescita annua del 8,7% fra il 2017 ed il 2023, anno in cui raggiungerà il valore di 52,8 miliardi di dollari. [Allied Market Research: Minimally Invasive Surgical Instruments Market- Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2017-2023].

STATO DELL'ARTE IN ITALIA ED ALL'ESTERO

Globalmente, i principali stakeholder sono soprattutto aziende Statunitensi; in Europa, vi sono diverse grandi aziende che si dedicano alla diagnostica ed all'imaging mini-invasivo, mentre per quanto riguarda le tecnologie per la cardiochirurgia, al momento, ci sono solamente poche imprese, tra cui una grande azienda italiana e diverse PMI, perché questo settore richiede un grado di interdisciplinarietà molto elevato ed ingenti investimenti in R&S.

In questi ultimi anni le tecnologie mini-invasive sono diventate sempre più importanti per il trattamento di molteplici patologie ed i settori più interessati sono stati: l'ortopedia, l'oncologia, la cardiochirurgia, l'urologia e l'otorinolaringoiatria ma molti altri ne sono stati influenzati quali la chirurgia estetica, vascolare, toracica, ginecologica, gastrointestinale e bariatrica.

Negli ultimi anni stanno assumendo sempre maggiore importanza procedure interventistiche basate sull'uso di ultrasuoni. Gli ultrasuoni usati per l'imaging nelle applicazioni ecografiche hanno frequenza ed intensità tali da non interagire apprezzabilmente con i tessuti umani, da cui deriva la loro accertata sicurezza ed innocuità. Tuttavia sono stati sviluppati sistemi HIFU (High Frequency Focused Ultrasound) che emettono ultrasuoni a potenze e frequenze tali da alterare localmente i tessuti che investono. Un innovativo campo di ricerca, ormai prossimo alle applica-

zioni cliniche, valuta l'associazione di microbolle in tali procedure. Le microbolle, quando sono investite da ultrasuoni ad alta potenza, scoppiano, creando delle micro-deflagrazioni che destabilizzano i tessuti nel loro immediato intorno. Si è visto che l'uso di specifiche microbolle consente di ottenere una maggiore efficacia di trattamento anche con ultrasuoni a potenza inferiore a quelle tipiche dell'HIFU, permettendo di ridurre i danni collaterali ai tessuti non patologici investiti da tali ultrasuoni.
Gli ambiti nei quali l'uso delle microbolle risulta particolarmente utile nei trattamenti con ultrasuoni sono:

- in associazione o come alternativa all'ipertermia oncologica (tumor thermoablation);
- nella permeabilizzazione locale e temporanea della barriera ematoencefalica (BBB), permettendo così ai farmaci di raggiungere zone malate del cervello alle quali normalmente non avrebbero accesso;
- nella rimozione dei trombi mediante ultrasuoni, in un approccio ancora sperimentale che facilita il recupero dopo ictus;
- nella permeabilizzazione delle membrane cellulari per favorire l'ingresso dei farmaci a DNA per gli approcci di terapia genica.

In tali casi le microbolle possono essere considerate dei dispositivi medici, in quanto facilitano una procedura interventistica, pur essendo costitutivamente simili alle microbolle usate come mezzi di contrasto, quindi dei farmaci, nell'imaging ecografico. In Italia, grazie alla presenza di una società leader nei mezzi di contrasto per ecografia, c'è il know-how che permette di studiare nuovi approcci terapeutici delle microbolle. Occorre creare le condizioni che favoriscano la ricerca preclinica e clinica di tali trattamenti mini-invasivi.
Un altro settore nel quale l'Italia ha competenze all'avanguardia è quello dei traccianti fluorescenti per la guida degli interventi chirurgici, con approccio sia tradizionale, sia mini-invasivo. Tuttavia questo tema ricade più propriamente nelle applicazioni dell'imaging molecolare ed è stato trattato nel corrispondente capitolo.
In campo oncologico, l'approccio sempre più integrato alla cura, richiede un'attenzione sempre maggiore verso l'utilizzo di tecnologie che consentano la messa in atto di procedure chirurgiche di altissima precisione e mini- invasive. Quindi, il trattamento chirurgico delle lesioni fa uso di innovative tecniche di imaging per la programmazione pre-operatoria, oltre che per la navigazione intra-chirurgica.
In particolar modo, l'imaging 3D ha rivoluzionato l'approccio chirurgico sia con la programmazione di un modello che si avvicini quanto più possibile alla ricostruzione ottimale, sia in fase chirurgica con una navigazione tridimensionale che permetta tagli e ricostruzioni millimetriche. Uno dei campi applicativi che sta assumendo una notevole importanza è la chirurgia maxillo-facciale, volta a ristabilire le funzionalità (masticazione, deglutizione, respirazione) e l'estetica.
L'imaging 3D consente, oltre a modelli per pianificazione preoperatoria e guida chirurgica, la realizzazione di impianti specifici per il paziente e la progettazione custom di protesi che vengono realizzate con la tecnica di milling, utilizzando materiali biocompatibili, impiantabili, essi stessi ad alto contenuto tecnologico, come innovative leghe metalliche e plastiche.

Per quanto costituiscano ancora un settore di nicchia per l'alto livello di sviluppo tecnologico necessario, esistono in Italia ed all'estero centri di ricerca oncologica e reparti ospedalieri leader nella applicazione di tali metodiche.
A centri medici altamente specializzati nell'utilizzo dei dispositivi MIS si affiancano aziende leader nella produzione di dispositivi ad alto contenuto tecnologico. Si tratta prevalentemente di aziende internazionali in cui la propensione alla Ricerca & Sviluppo è molto alta ed in cui gli investimenti in tal senso sono cospicui.
Per quanto riguarda l'ortopedia, tra i principali settori di interesse attuale ci sono la protesica di anca e ginocchio e l'interventistica su piede in cui le tecniche mini-invasive comportano una pluralità di vantaggi al paziente in termini di buona riuscita delle operazioni nonché di riduzione del dolore, velocizzazione della guarigione e diminuito rischio di infezioni e necrosi della cute.
Ad esempio, se un tempo le indicazioni chirurgiche per l'articolazione coxo-femorale erano prevalentemente di tipo protesico, attualmente, laddove possibile, si considerano sempre più interventi conservativi che rispettino l'articolazione e permettano di prevenire o ritardare procedure chirurgiche maggiormente demolitive. Conseguentemente, anche le metodiche di intervento cercano soluzioni meno invasive.
Di fondamentale importanza in campo ortopedico è l'introduzione e la diffusione di materiali biocompatibili per protesi sempre più leggere e facilmente integrabili con interventi poco invasivi cioè di breve durata, in modo da ridurre il rischio di infezioni, e necessitare di micro incisioni per l'inserzione dei dispositivi protesici, col supporto di manipolatori robotici e tecnologie di imaging per poter verificare il posizionamento corretto del dispositivo.

Un'altra branca dell'ortopedia in cui è importantissimo incrementare la disponibilità di tecniche interventistiche di altissima precisione e guidate da tecniche imaging, è la chirurgia del rachide. Sicuramente, in questo contesto, come negli altri campi dell'ortopedia, la computed assisted surgery contraddistinguerà la ricerca scientifica dei prossimi anni in campo ortopedico.
La disponibilità di un sistema di guida negli interventi della colonna vertebrale consente di avere una immagine di riferimento durante l'intervento. Una procedura di questo tipo aumenta l'accuratezza (incisioni più piccole, migliore posizionamento) e la sicurezza dell'intervento grazie all'utilizzo di software specifici per la guida 3D virtuale e, la pianificazione dell'intervento tramite individuazione di punti di repere tracciati.
Un altro settore che si inserisce nelle tecnologie MIS innovative, ed è oggetto attuale e futuro di ricerca scientifica, è lo sviluppo di robot medicali miniaturizzati in grado di operare dall'interno, entrando nel corpo attraverso un orifizio naturale o piccole incisioni, evitando la chirurgia e riducendo quindi i traumi e i tempi di recupero. Questo tipo di dispositivo inoltre abilita nuove terapie, come il rilascio farmaco localizzato, garantendo trattamenti personalizzati sulle esigenze del paziente, ad esempio, per il trattamento di patologie croniche come quelle infiammatorie del tratto gatrointestinale (e.g. morbo di Chron, coliti ulcerose).
Per quanto capsule endoscopiche wireless per l'esame del tratto gastrointestinale, siano già state sviluppate, le previsione per il prossimo futuro è appunto quella di integrare ulteriori funzioni "smart", oltre a quella diagnostica di imaging endoscopico, come funzioni di rilascio farmaco localizzato e tool chirurgici miniaturizzati e tele-guidati per biopsia con l'obiettivo di implementare a

bordo di una capsula ingoiabile proprietà terapeutiche ed interventistiche.
Questo tipo di dispositivi miniaturizzati presenta come maggiori vantaggi quelli di:

- poter rilasciare una terapia localizzata, con conseguente riduzione della dose di farmaco somministrato e riduzione degli effetti collaterali a livello sistemico;
- riduzione dei costi, legati a una riduzione delle dosi di farmaco necessario;
- riduzione dei periodi di ospedalizzazione.

Questi vantaggi conferiranno alle capsule per azioni terapeutiche un ruolo dominante tra i nuovi trattamenti medicali, in particolare per il rilascio farmaco localizzato.
Per quanto riguarda il settore cardiovascolare, c'è sempre stata una estrema attenzione sia sulla biocompatibilità e sulla durata dei dispositivi (per evitare un re-intervento) sia sullo sviluppo di materiali e tecnologie per gli interventi mini-invasivi (comprendenti anche l'approccio percutaneo). Le tecnologie TAVI (Transcatheter Aortic Valve Implant) si sono ritagliate una nicchia nel mercato che sta sempre di più aumentando, ma questo è un settore in cui c'è ancora molto spazio per il miglioramento e l'innovazione come per esempio l'applicazione dell'approccio percutaneo nella riparazione/sostituzione della valvola mitrale.
Molto deve essere ancora fatto per ottimizzare una protesi valvolare cardiaca utilizzando innovative tecnologie e materiali che permettano di collassarla (crimping) sul delivery system, così da poterne ridurre notevolmente l'ingombro al momento dell'impianto, ed essere in grado di ritornare alle dimensioni originali una volta posizionata, mantenendo intatte le proprie caratteristiche di resistenza e biocompatibilità nel tempo.
Nell'ambito cardiaco si punta molto verso dispositivi medici e tecnologie che permettano interventi a cuore battente, che evitino pertanto l'utilizzo della Circolazione Extra Corporea e che, grazie all'utilizzo di MIS permettano una veloce convalescenza e ritorno alla vita lavorativa. Viene pertanto inclusa nelle tecniche MIS anche la cardiochirurgia che non comporta l'uso della macchina cuore-polmone e che consente l'intervento sul cuore attraverso accessi limitati (mini-sternotomia, toracotomia anteriore destra e toracotomia destra). Queste tecniche permettono una minore perdita di sangue, un impatto ridotto dell'anestesia ed una cicatrice più piccola rispetto alle tecniche tradizionali a cuore aperto. Tali interventi tipicamente richiedono l'uso di strumenti laparoscopici e/o strumenti di manipolazione controllati da remoto (bracci robotizzati), con l'osservazione indiretta del sito operatorio.
Alcune aree di sviluppo futuro in ambito cardiaco potrebbero essere:

- miniaturizzazione dei dispositivi medici attualmente in commercio;
- dispositivi e sistemi di rilascio per il rimodellamento/sostituzione della valvola mitrale (anche per via percutanea);
- sistemi per la rimozione della valvola aortica nativa danneggiata/malata (che attualmente viene lasciata in loco in caso di interventi percutanei).

Nell'otorinolaringoiatria la chirurgia endoscopica funzionale dei seni paranasali è una rivoluzione che è iniziata negli anni '90 trasferendo gli strumenti, e l'esperienza, che derivavano dalla chirurgia laparoscopica addominale o toracica.

Alcuni degli utilizzi più recenti delle tecniche mini-invasive in questo settore sono l'uso del sistema detto NBI (Narrow Band Imaging) che permette di individuare cellule patologiche invisibili all'occhio umano, guidando il chirurgo nella loro asportazione per garantire una resezione completa e radicale del tumore, e strumenti di nuova generazione come la robotica e il 3D, i laser, i bisturi a radiofrequenze o ad ultrasuoni.
In urologia, le tecnologie mini-invasive sono molto utilizzate. Un esempio è l'asportazione di calcoli renali tramite Microperc (evoluzione della litotrissia percutanea) che per la frantumazione utilizza una microfibra laser introdotta tramite un foro le cui dimensioni sono simili a quelle della punta di un ago da siringa.
Si utilizzano bracci robotici per effettuare prostatectomie e laser per l'asportazione dell'adenoma prostatico, in quanto sono in grado di isolare ed estrarre l'adenoma senza doverlo distruggere, permettendo così l'esecuzione di tutti gli accertamenti necessari.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

È molto difficile valutare le risorse economiche necessarie per lo sviluppo dei "Dispositivi medici e tecnologie mini-invasive" in quanto, come si è appena visto, questo è un coacervo di nuovi medical device e tecnologie necessarie per lo sviluppo di materiali e delivery system utilizzati per la chirurgia mini-invasiva.
A titolo di esempio possiamo solo accennare al fatto che per lo sviluppo di una innovativa protesi valvolare cardiaca da impiantare per via mini-invasiva e dei delivery system dedicati, il costo delle sole attività di R&S può aggirarsi sui 40 Milioni di Euro.
È infine da sottolineare come, grazie a bandi regionali, nazionali o europei (che sempre più si stanno focalizzando nel dare accesso ai fondi a progetti innovativi multidisciplinari come appunto quelli relativi alle tecnologie mini-invasive) una parte delle risorse potrebbero essere reperite dall'aiuto finanziario pubblico (anche se l'accesso a tali fondi è sempre più difficile a causa sia della riduzione dei finanziamenti messi a disposizione sia della sempre più numerosa partecipazione a tali bandi).

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 8

TERAPIE AVANZATE E GENE EDITING

L'utilizzo di cellule nella pratica clinica ha portato allo sviluppo di una nuova categoria di medicinali applicati alla terapia di diverse patologie, sia acquisite o ereditarie, denominati "Prodotti Medicinali per Terapie Avanzate" e definiti come medicinali biologici atti a trattare e a prevenire malattie o che possano essere utilizzati o somministrati al fine di ristabilire, correggere o modificare funzioni fisiologiche con una azione principalmente farmacologica, immunologica o metabolica, offrendo nuove opportunità per il trattamento di malattie o disfunzioni non curabili con i farmaci tradizionali. Questi medicinali, che a tutti gli effetti, con i recentissimi sviluppi, sono veri e propri farmaci, stanno rivoluzionando il mondo della medicina sia per la loro natura, cellule contro piccole molecole di sintesi o macromolecole come anticorpi e proteine, sia per i modelli di terapia paziente-specifico o nicchie di pazienti rispetto alla medicina tradizionale sviluppata per masse di popolazioni. Inoltre, rispetto alle terapie convenzionali, tipicamente volte ad alleviare i sintomi, le terapie avanzate sono sviluppate fin dall'inizio per curare le cause delle patologie.

Il Regolamento 1394/2007 ha definito le Terapie Avanzate come prodotti medicinali sterili il cui principio attivo è rappresentato da cellule e possono essere classificati in quattro gruppi principali:

- **Medicinali di terapia cellulare somatica**: contenenti cellule o tessuti che sono state manipolate per cambiare le loro caratteristiche biologiche o cellule o tessuti non destinati ad essere utilizzati per le stesse funzioni essenziali originali e che possono essere utilizzati per curare, diagnosticare o prevenire le malattie;
- **Medicinali di terapia genica**: contenenti geni che portano ad un effetto terapeutico, profilattico o diagnostico, attraverso l'inserimento in laboratorio di DNA "ricombinante" in sostituzione di un gene difettoso o mancante, di solito per il trattamento di una varietà di malattie, tra cui malattie genetiche, oncologiche o malattie a lunga prognosi;
- **Medicinali di ingegneria tissutale**: contenenti cellule o tessuti che sono stati modificati in modo da poter essere utilizzati per riparare, rigenerare o sostituire tessuti umani;
- **Medicinali di terapia avanzata combinati**: contenenti uno o più dispositivi medici come parte integrante del medicinale come ad esempio le cellule fatte crescere su matrici biodegradabili o supporti sintetici tridimensionali (scaffolds).

Le cellule che compongono i prodotti per Terapie Avanzate sono di origine umana, animale, o entrambe, possono essere vitali o non vitali e possono essere combinate con altre sostanze come biomolecole, sostanze chimiche, matrici biodegradabili o scaffolds. Sono esclusi dalla definizione i prodotti che contengono esclusivamente cellule non vitali e che non agiscono principalmente con

azione farmacologica, immunologica, o metabolica.
Sono considerati TA tutte quelle manipolazioni definite estensive, vale a dire tutte quelle manipolazioni che possono portare ad un'attivazione delle cellule e/o ad una stimolazione della capacità proliferativa, come l'espansione di una o più popolazioni di progenitori (espansione ex vivo) o l'inserzione di uno o più geni in una popolazione di progenitori (manipolazione genica), i dispositivi medici associati ad un prodotto cellulare al quale è associata l'azione terapeutica primaria, nonché l'utilizzo non omologo delle cellule inoculate in distretti diversi da quello di origine.
Sono esempi di Terapie Avanzate:

- Cellule espanse ex-vivo
- Linfociti sensibilizzati in vivo contro un antigene tumorale
- Cellule staminali prelevate da tessuto adiposo per curare fistole e ulcere
- Cellule staminali emopoietiche prelevate e selezionate e iniettate per via intracoronarica in seguito ad infarto del miocardio
- Cellule modificate nel DNA, con l'inserzione di un gene terapeutico in sostituzione di un gene difettoso al fine di curare malattie genetiche
- Linfociti T ingegnerizzati (CAR-T)

Non vengono considerate Terapie Avanzate, bensì manipolazioni minime applicabili a cellule e tessuti a scopo terapeutico e non di ricerca, tutte le procedure di taglio, macinazione, sagomatura, centrifugazione, immersione in soluzioni antibiotiche ed anti microbiche, sterilizzazione, irradiazione, separazione, concentrazione o purificazione cellulare, filtrazione, liofilizzazione, congelamento, crioconservazione, vetrificazione che sottostanno in senso stretto alla normativa trasfusionale e trapiantologica di cellule e tessuti.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

I prodotti per Terapie Avanzate costituiscono attualmente la frontiera dei farmaci innovativi. Essi seguono nello sviluppo la filiera del farmaco tradizionale ma essendo la loro natura così diversa, il processo è in ogni step molto più complesso sia dal punto di vista produttivo che di Sistema di Qualità e Regolatorio e in continua evoluzione. Questa peculiarità ha fatto sì che l'Agenzia del Farmaco Europea, EMA, ormai dedichi ai medicinali per Terapie Avanzate capitoli specifici per tutti gli aspetti della loro produzione. La prima caratteristica è che questi farmaci non si possono sterilizzare terminalmente per la natura del loro contenuto cellulare ma al contempo essendo farmaci iniettabili devono essere sterili, quindi occorre approntare processi produttivi robusti con un sistema di qualità eccellente secondo il concetto che la qualità del prodotto è la qualità del processo.
Nell'ambito della produzione questi medicinali vengono prodotti sotto forma di lotti dedicati, specifici per il singolo paziente o per nicchie di pazienti e quindi i bioreattori più idonei solo quelli monouso che alla fine del processo vengono eliminati. La tecnologia del monouso (SUT, Single Use Tecnology) sta prendendo piede in modo pervasivo e negli ultimi anni sta avendo uno sviluppo esponenziale con sistemi sempre più performanti alla produzione e al recupero di cellule vitali, con le caratteristiche fenotipiche desiderate, sterili (PAL platform for Cell Therapy, GE plat-

form). Con una produzione di questo tipo anche gli impianti produttivi per terapie a base di cellule stanno subendo una profonda trasformazione verso unità compatte equipaggiate da bioreattori monouso, preferibilmente vicine agli ospedali. Questi impianti dedicati vengono chiamati Cell Factory e in l'Italia che è campione in Europa nello sviluppo di queste terapie ce ne sono 18. Le Cell Factory sono strutture GMP, dedicate alla produzione di prodotti cellulari composte da aree a contaminazione controllata, in cui è possibile manipolare cellule destinate ad essere infuse nei pazienti per la rigenerazione di tessuti e di organi, secondo quanto stabilito dalle norme GMP di riferimento (Eudralex vol. 4).

Il processo produttivo dei prodotti a base di cellule è molto costoso soprattutto per la quantità di test di controlli di qualità che vengono richiesti dalle autorità regolatorie, sia durante il processo sia al rilascio del lotto. A livello di associazioni e in collaborazione con gli organi regolatori si stanno studiando possibilità di ridurre questo carico di test di QC, ma i medicinali per Terapie Avanzate sono ancora troppo nuovi, la maggior parte dei quali è in sperimentazione clinica e solo alcuni si stanno affacciando ora sui mercati, quindi ci vorrà ancora tempo per maturare un'esperienza clinica maggiore. per poter valutare gli eventuali rischi per i pazienti connessi all'uso del prodotto sperimentale. I rischi che devono essere assolutamente tenuti sotto controllo sono oltre a quelli dovuti alla trasmissione di malattie infettive o alla presenza di contaminanti dei prodotti cellulari, rischi di trasformazioni oncogenetiche delle cellule utilizzate e di reazioni immunitarie.

A livello regolatorio, tutti i prodotti di Terapia Avanzate sono prodotti medicinali ed il nuovo Regolamento che li disciplina è un emendamento alla Direttiva sui farmaci (2001/83/EC), implementata in Italia con il Codice Comunitario del farmaco. Il D.Lgs. 219/2006 e successive modifiche, che recepisce a livello nazionale il Codice comunitario concernente i medicinali per uso umano, rappresentata dalla Direttiva europea 2001/83/CE e successive direttive di modifica, nonché la Direttiva 2003/94/CE recepiscono i Prodotti per Terapie Avanzate come prodotti medicinali per sperimentazione clinica che devono essere soggetti agli stessi standard qualitativi, richiesti per la messa in commercio dei farmaci.

A livello europeo l'Agenzia Europea del Farmaco (EMA) ha istituito il Comitato per le Terapie Avanzate (CAT) la cui funzione è quella di valutare ed esprimere parere in merito alla qualità e la sicurezza e l'efficacia delle Terapie Avanzate prima dell'autorizzazione all'immissione in commercio, di seguirne il loro sviluppo scientifico nel campo, nonché di esprimere parere in merito a questioni scientifiche relate al disegno degli prodotti per Terapie Avanzate.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Attualmente il 50% del totale dei farmaci in sperimentazione clinica sono farmaci biotecnologici di terapie avanzate, di cui 8 solo in Europa già autorizzati alla commercializzazione (Tabella 1) e con un primato italiano in merito, avendo il nostro paese sviluppato 3 della terapie avanzate attualmente in commercio in Europa:

- Holoclar®: terapia cellulare di Chiesi/Holostem che permette la rigenerazione completa del tessuto della cornea a partire da un gruppo di cellule staminali autologhe (cioè del paziente stesso) che risiedono unicamente in una piccola parte dell'occhio chiamata limbus, al confine tra la cornea e la congiuntiva (la parte bianca attigua).

- Strimvelis®: terapia genica sviluppata da Telethon e poi licenziata prima a GSK ed oggi ad una sua controllata Orchard Therapeutics, ex vivo con cellule staminali per trattare i pazienti affetti da una rarissima malattia chiamata ADA-SCID (immunodeficienza severa combinata da deficit di adenosina-deaminasi) e per i quali non è disponibile un donatore compatibile in base al sistema HLA (human leukocyte antigen) per il trapianto di cellule staminali. Con la terapia Strimvelis, le cellule vengono prelevate dal midollo osseo del paziente e viene impiegato un vettore per inserire una copia normale del gene di ADA all'interno delle cellule stesse.
- Zalmoxis®: terapia cellulare paziente-specifica di MolMed, basata sull'ingegnerizzazione del sistema immunitario, impiegata in associazione al trapianto aplo-identico di cellule staminali ematopoietiche in pazienti adulti affetti da leucemie e altri tumori del sangue ad alto rischio. Zalmoxis® è una terapia basata sull'impiego di linfociti T geneticamente modificati in cui è stato inserito grazie all'ingegneria genica un "gene suicida" inducibile. Una volta infuse nei pazienti sottoposti a un trapianto di cellule staminali ematopoietiche da donatore parzialmente compatibile, queste cellule facilitano l'effetto antileucemico, eliminando il ricorso alla profilassi immunosoppressiva post-trapianto e stimolando una rapida ricostituzione immunologica. Il gene suicida permette di controllare prontamente la cosiddetta "malattia del trapianto contro l'ospite" (Graft versus Host Disease - GvHD).

Nel contesto delle nuove frontiere terapeutiche sperimentali un esempio di terapia genica ex vivo attualmente in uso in protocolli di terapia sperimentale è il conferimento alle cellule del sistema immunitario la capacità di combattere la leucemia tramite i recettori chimerici antigeni specifici CAR-T. La terapia chimeric antigen receptor T (CAR-T) cell therapy è la frontiera più avanzata della ricerca nella lotta contro i tumori: il primo farmaco di questa nuova classe di terapie cellulari – Kymriah™ (tisagenlecleucel, CTL019) di Novartis – è stato approvato lo scorso agosto dall'FDA rendendolo così disponibile negli USA e a settembre in Europa. La nuova terapia cellulare trova indicazione nel trattamento di pazienti fino a 25 anni d'età affetti da leucemia linfoblastica acuta (ALL) con cellule B precursori, refrattaria al trattamento o alla seconda ricaduta.

Il secondo medicinale a base di CAR-T approvato è stato YESCARTA (axicabtagene ciloleucel). Si tratta di un trattamento immunoterapico a base di cellule T autologhe geneticamente modificate in modo da riconoscere l'antigene CD19. Per preparare YESCARTA, le cellule T del paziente vengono prelevate e modificate geneticamente ex vivo mediante trasduzione retrovirale in modo che esprimano un recettore chimerico per l'antigene, detto CAR (chimeric antigen receptor), contenente un frammento variabile a catena singola dell'anticorpo anti-CD19 di origine murina, legato al dominio costimolatorio di CD28 e al dominio di segnalazione di CD3-zeta. Le cellule T CAR-positive anti-CD19 vive vengono moltiplicate e reinfuse nel paziente, dove saranno in grado di riconoscere ed eliminare le cellule che esprimono l'antigene CD19.

MA	PRODUCT	COMPANY	THERAPEUTIC AREA	ACTIVE SUBSTANCE
2018	Alofisel	TiGenix	Perianal fistulas in Crohn disease	A suspension of activated expanded adipose stem cells from donors
2017	Spherox	Co.Don	Damaged knee cartilage	A suspension of spheroids of human autologous matrix-associated chondrocytes for implantation into the knee joint
2016	Strimvelis	GSK-Telethon	Severe Combined Immunodeficiency	Autologous CD34+ enriched cell fraction that contains CD34+ cells transduced with retroviral vector that encodes for the human adenosine deaminase (ADA) cDNA sequence from human haematopoietic stem/progenitor (CD34+) cells
2016	Zalmoxis	MolMed	GVH Disease Hematopoietic stem cell transplantation	Allogeneic T cells genetically modified with a retroviral vector encoding for a truncated form of the human low affinity nerve growth factor receptor (ΔLNGFR) and the herpes simplex I virus thymidine kinase (HSV-TK Mut2)
2015	Holoclar	Chiesi	Corneal Diseases stem cell transplantation	Ex vivo expanded autologous human corneal epithelial cells containing stem cells
2015	Imlygic	Amgen	Unresectable metastatic melanoma	An oncolytic virus derived from HSV-1 modified to replicate within tumours and to produce the immune stimulatory protein human GM-CSF, which promotes a systemic anti-tumour immune response and an effector T-cell response
2018	Kymriah	Novartis	Acute Linfoblastic Leukemia DLBC lymphoma	A Chimeric Antigen Receptor T-cell therapy, where T cells of the patient are modified to recognize cancer cells in order to more effectively target and destroy them
2018	Yescarta	Gilead	Non-Hodgkin lymphoma	A Chimeric Antigen Receptor T-cell therapy, where T cells of the patient are modified to recognize cancer cells in order to more effectively target and destroy them.
2018	Luxturna	Spark Ther	Inherited retinal disease	Gene therapy

Le terapie cellulari CAR-T fanno parte delle cosiddette immunoterapie adoptive cell transfer (ACT). Le terapie cellulari CAR-T utilizzano come substrato i linfociti T del paziente, prelevati dal suo sangue tramite leucaferesi: le cellule vengono crioconservate e trasferite al sito di produzione, dove subiscono una riprogrammazione genetica mediante tecniche di gene editing e il ricorso a vettori virali.

Attualmente esistono diversi vettori virali che vengono utilizzati nell'ingegnerizzazione dei linfociti T per generare le CAR-T. I più comunemente impiegati sono i vettori retrovirali e i vettori lentivirali. Contrariamente a quanto si possa pensare, questi vettori, che sono giunti ormai alla quarta generazione, non comportano rischi per gli operatori durante le operazioni di produzione e pertanto sono impiegati in facility GMP che non hanno bisogno di particolari requisiti di sicurezza, oltre quelli normalmente adottati nella produzione di proteine ricombinanti da cellule di mammifero.

In Italia esistono già alcune realtà industriali che producono vettori retrovirali e lentivirali ma c'è sicuramente un grosso margine di sviluppo per aziende biotech che volessero affacciarsi a questo tipo di produzione. Come accennato, il mercato per questo tipo di terapie è appena agli albori ma promette un'espansione molto forte nei prossi 5-10 anni. In Italia l'Ospedale Pediatrico Bambin Gesù di Roma è all'avanguardia nella terapia a base di CAR-T. Attualmente sono in corso due trials clinici presso l'ospedale su pazienti affetti da neuroblastoma, linfoma Non-Hodgkin e leucemia linfoblastica acuta. Non c'è dubio che nel futuro prossimo ci sarà un'impennata di terapie a base di CAR-T e, di conseguenza, il sistema produttivo biotech italiano ha l'opportunità di intercettare

quest trend in continua crescita innanzitutto con l'aumento di capacità produttiva di vettori virali. Sono anche utilizzate metodiche non virali di manipolazione genica che sfruttano il sistema cosiddetto "Sleeping Beauty", basato sull'uso di molecole di DNA circolari, dette trasposoni, che, veicolate nel nucleo cellulare tramite esposizione della cellula ad un campo elettrico (tecnica di nucleofezione), sono capaci di inserirsi nel genoma umano.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

L'entrata nel mercato di queste terapie avrà un effetto molto potente su tutto il Sistema della Salute.

Quindi è necessario approntare un contesto favorevole e soprattutto capace di far fronte con competenza i grossi cambiamenti a cui questi farmaci cellulari mettono di fronte.

Affrontare l'inserimento di questi farmaci cellulari nel Sistema Sanitario con le vecchie regole del farmaco tradizionale comprometterebbe l'accesso dei pazienti a questi farmaci. In un prossimo futuro sarà sempre più importante avere impianti produttivi in grado di far fronte alle richieste di questi farmaci cellulari. L'Italia che già si distingue in Europa per numero di Cell Factories potrebbe giocare un ruolo importante nell'ampliare le stesse o stanziarne di nuove con investimenti nei prossimi 5 anni intorno al centinaio di Milioni di euro.

L'altro fronte è quello del consistente numero di nuove approvazioni per il commercio soprattutto di terapia genica, a cui fa seguito lo stanziamento di risorse necessarie per la sostenibilità economica di questi farmaci che sono molto costosi e di conseguenza potenzialmente non gestibili dai sistemi sanitari nazionali a meno di trovare criteri di rimborsabilità adeguati per avere accesso al mercato con la conseguenza di dover fare una comunicazione adeguata al pubblico.

BIBLIOGRAFIA

Regolamento CE 1394/2007: normativa di riferimento per i medicinali di terapia genica, di terapia cellulare somatica e di ingegneria tissutale

Direttive CE 2004/23, 2006/17 e 2006/86 disciplinanti le fasi di approvvigionamento, controllo, lavorazione di tessuti e cellule umane

Direttiva CE 2001/83 e ss.mm.ii: codice comunitario concernente i medicinali per uso umano

Regolamento CE 726/2004 inerenti la procedura di autorizzazione centralizzata relativa ai medicinali per uso umano

Decreto Legislativo 24.04.2006 n. 219. Attuazione della direttiva 2001/83/CE (e successive direttive di modifi ca) relativa ad un codice comunitario concernente i medicinali per uso umano, nonché della direttiva 2003/94/CE.

Direttiva CE 20/2001, che regola l'approvazione e l'esecuzione di studi clinici.

Legge 21.10.2005 n. 219. Nuova disciplina delle attività trasfusionali e della produzione nazionale degli emoderivati.

Direttiva 2004/23/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 31.03.2004 sulla definizione di norme di qualità e di sicurezza per la donazione, l'approvvigionamento, il controllo, la lavorazione, la conservazione, lo stoccaggio e la distribuzione di tessuti e cellule umani, attuata col Decreto Legislativo 6.11.2007 n. 191.

Buone pratiche di fabbricazione. Linee guida AFI, Volume 2
Eudralex Vol. 4 GMP
Farmacopea Europea (EP) Ed 9.0
PIC/S Guide to good practices for the preparation of medicinal products in healthcare establishments
FDA Guidance for Industry: Sterile drug products produced by aseptic processing – Current Good Manufacturing Practice
ICHQ10 "Guide line on pharmaceuthical quality system"
ICHQ9 "Guide line on quality risk managment"
ICHQ2 "Validation of Analytical Procedures"
ICHQ5 "Quality of Biotechnological Products"

GENE EDITING

Il gene editing è una tecnologia avanzata che consente la correzione mirata di una sequenza di DNA. Per effettuarlo si usano delle proteine della classe delle endonucleasi, enzimi in grado di tagliare in punti precisi la doppia elica del DNA, proprio come delle forbici.
La tecnologia di editing ad oggi più conosciuta si basa sul sistema CRISPR/Cas9, che utilizza l'endonucleasi Cas9 (caspasi 9) in grado di introdurre le modifiche desiderate con una precisione senza precedenti nella storia dell'ingegneria genetica. La macchina molecolare così costruita si ispira a un sistema batterico chiamato CRISPR (acronimo di clustered regularly interspaced short palindromic repeats) presente in circa la metà dei batteri e nel 90% degli archei.
Per indirizzare la proteina Cas9 verso il sito del bersaglio desiderato bisogna dotarla di una breve sequenza di RNA complementare a quella del sito corrispondente di DNA che si vuole correggere o inattivare, che aiuterà la localizzazione della nucleasi nella posizione corretta. Si forma così un complesso RNA-caspasi che arriva nel punto voluto, tagliando il DNA. Una volta tagliato, il DNA viene aggiustato dai naturali meccanismi di riparazione della cellula
In questo modo è possibile introdurre i cambiamenti desiderati mediante introduzione di mutazioni puntiformi, indistinguibili da quelle naturali, che possono essere impiegate per spegnere un gene dannoso. Oppure è possibile inserire un intero tratto di DNA sostituendo la porzione del gene difettoso e consentire quindi che possa tornare a funzionare oppure possibile inserire un segmento nuovo di DNA, che conferisce una nuova caratteristica utile. Poiché il sistema funziona in tutti gli organismi – dai batteri, alle piante, all'uomo – le possibili applicazioni appaiono quasi illimitate.

Potenziali applicazioni

Le tecniche di gene editing ed in particolare la tecnologia CRIPSR/Cas9 hanno numerose potenzialità conoscitive e applicative nei settori più svariati dalla riproduzione animale alle biotecnologie industriali, dalle piante all'ambito umano, dal miglioramento delle conoscenze legate al funzionamento dei singoli geni alle applicazioni terapeutiche.
Tra le aree di ricerca più promettenti in ambito terapeutico, ci sono lo sviluppo di nuovi farmaci, le terapie geniche e cellulari, gli xenotrapianti. Molte le possibili applicazioni anche in campo agroa-

limentare, ad esempio per rendere le piante più resistenti agli stress o per controllare le malattie trasmesse dagli insetti. In campo industriale, infine, si spera che l'editing genomico favorisca lo sviluppo di prodotti utili come una nuova classe di biocombustibili. Le diverse applicazioni comportano vantaggi, rischi e considerazioni etiche differenti, perciò andrebbero valutate separatamente, caso per caso. Ovviamente, data l'estrema versatilità del sistema CRISPR/Cas9, uno dei temi maggiormente discussi in campo bioetico riguarda gli interventi sulle cellule somatiche e germinali umane e sugli embrioni ai primi stadi di sviluppo.
Al momento la comunità scientifica è unanime nello sconsigliare il cosiddetto editing della linea germinale, piuttosto che l'intervento di correzione dei geni difettosi negli embrioni umani, per via dell'ereditarietà dei caratteri alle generazioni successive (cfr. sul punto parere del Comitato nazionale per la bioetica del 23 Febbraio 2017).

La Battaglia Sul Fronte Dei Brevetti: A Chi Appartiene La Tecnologia Crispr/Cas9?

La natura rivoluzionaria della tecnologia ha altresì risvolti ed implicazioni imponenti sul fronte della proprietà intellettuale. Una intensa battaglia tra i titolari dei principali brevetti il MIT del Massachusetts e l'Università di Harvard da una parte e l'Università di Berkeley (insieme all'Università della California, Emmanuelle Charpentier e il Max Planck Institute di Berlino) dall'altra, anima l'Ufficio Brevetti europeo (EPO) e quello statunitense (USPTO), ormai da diversi anni. L'Università di Berkeley et al. brevetta effettivamente per prima l'utilizzo del sistema CRISPR9/Cas9 ma in cellule procariotiche.

MIT/Harvard sono stati invece i primi a depositare nel 2012 una domanda di brevetto negli USA concernente l'utilizzo della tecnica CRISPR/Cas9 per la modifica del genoma nelle cellule eucariotiche. Le cellule eucariotiche sono tipiche degli organismi superiori, come piante e animali, ma condividono con i batteri la stessa struttura del DNA. L'Università di Berkeley ha rivendicato la paternità dell'invenzione sostenendo che il test sugli eucarioti era solo una chiara conseguenza della scoperta di poter riprogrammare il sistema CRISPR-Cas9. È iniziato così un lungo contenzioso di fronte all'Ufficio brevetti degli Stati Uniti tra le due istituzioni che si è concluso in fase di appello a favore del MIT, che ha quindi potuto mantenere la propria titolarità sui brevetti sulla tecnologia CRISPR-Cas9 applicata alle cellule eucariotiche.
Ma chiaramente anche il versante europeo è interessato ed attualmente sono pendenti una serie di procedimenti di opposizione sui rispettivi brevetti di titolarità dei due pool di istituzioni avanti all'Ufficio Brevetti Europeo. Qui la situazione è più favorevole della Università di Berkeley et al. che hanno avuto concessi diversi brevetti su un ampio utilizzo del sistema CRISPR-Cas9, mentre il brevetto capostipite a nome MIT/Harvard è stato revocato dall'Ufficio Brevetti europeo perché non rivendicava validamente la priorità. D'altronde i sistemi brevettuali statunitense ed europeo sono differenti e sulla base della giurisprudenza europea, potrebbe ance ritenersi che brevetto dell'Università di Berkeley fornisca di per sé una "motivazione sufficiente" per tentare di applicare la tecnica alle cellule eucariote. La situazione crea notevoli perplessità ai numerosi operatori del settore che potrebbero essere interessati allo sfruttamento di questi titoli brevettuali sotto accordi di licenza, ma che ovviamente non comprendono di chi sia effettivamente la titolarità sulla tecnologia CRISPR/Cas9.

È verosimile che all'esito di tutti questi contenziosi brevettuali ci si confronterà con due scenari di proprietà intellettuale completamente diversi nei due principali mercati interessati alla tecnologia.

BIBLIOGRAFIA

Parere del Comitato nazionale per la bioetica "L'EDITING GENETICO E LA TECNICA CRISPR-CAS9: CONSIDERAZIONI ETICHE" – del 23 Febbraio 2017

SETTORE 5

>TECNOLOGIE DIGITALI<

MEMBRI DEL GRUPPO DI LAVORO

Settore – Tecnologie digitali

Coordinatori	
PIRELLI	**Lucio Pinto**
CEFRIEL	**Alfonso Fuggetta**
Componenti	
BIRD & BIRD	**Federico Marini Balestra**
EIDON LAB	**Federico Piutti**
ELETTRA SINCROTRONE TRIESTE	**Roberto Pugliese**
ERICSSON TELECOMUNICAZIONI	**Paola Iovanna**
HIT	**Fulvio Basili**
INSTM	**Roberto Pilot**
JABIL CIRCUIT ITALIA	**Davide Malacalza**
SMILAB	**Fabio Chiesa**
STMICROELECTRONICS	**Andrea Pagni**
THALES ALENIA SPACE ITALIA	**Dario Fossati**
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO-BICOCCA	**Carlo Batini**
	Alberto Dennunzio
UNIVERSITÀ DI PISA	**Giovanni Vozzi**
UNIVERSITÀ DI ROMA TOR VERGATA	**Francesca Polizio**
TELECOM ITALIA	**Raffaele De Peppe**
WARRANT HUB	**Luca Onnis**

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 1

CLOUD COMPUTING

La storia delle strutture dei sistemi ICT passa attraverso alcune fasi ben conosciute che riassumiamo per comprendere meglio la collocazione del Cloud Computing.

Nella storia si è passati dalle architetture mainframe centric a quelle client-server e, con l'uso predominante della rete alle architetture di computer collegati in rete locale (LAN) o geografica (WAN) .

Il Cloud Computing rappresenta l'estensione più avanzata delle architetture ICT, in quanto attraverso la rete permette l'accesso ad applicazioni e dati non più residenti sui sistemi locali ma residenti su un hardware remoto, con un approccio tendenzialmente a servizio e "pay per use".

I sistemi cloud sono quindi grandi contenitori di risorse virtuali di facile utilizzo ed accesso che mettono a disposizione vari software, hardware, piattaforme di sviluppo e di servizio. Queste infrastrutture informatiche possono essere dinamicamente riconfigurate per adattarsi al carico di lavoro.

La figura 1 rappresenta chiaramente l'architettura del Cloud Computing.

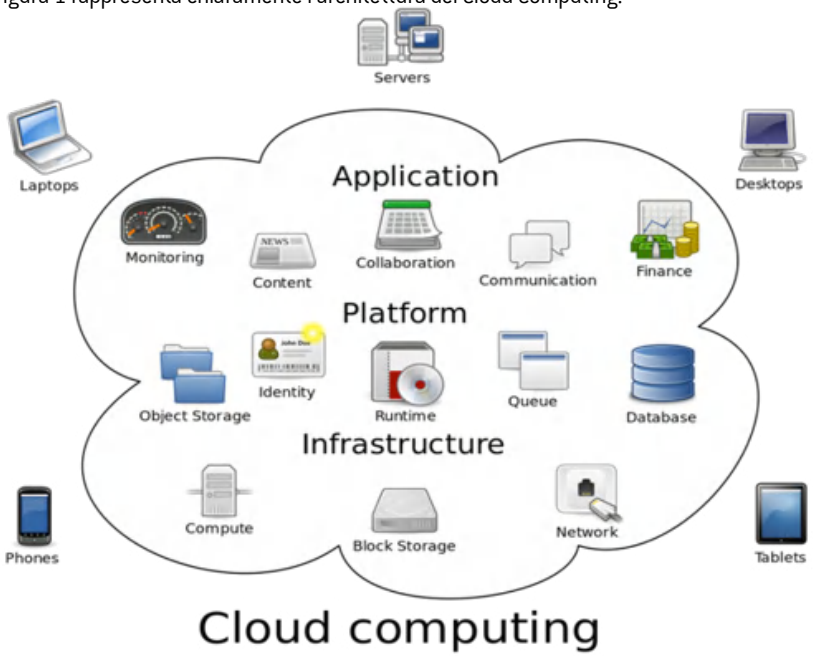


FIGURA 1

La figura 2 (Fonte NIST) evidenzia le caratteristiche, i servizi ed i tipi di sistemi cloud che verranno descritti in questa trattazione

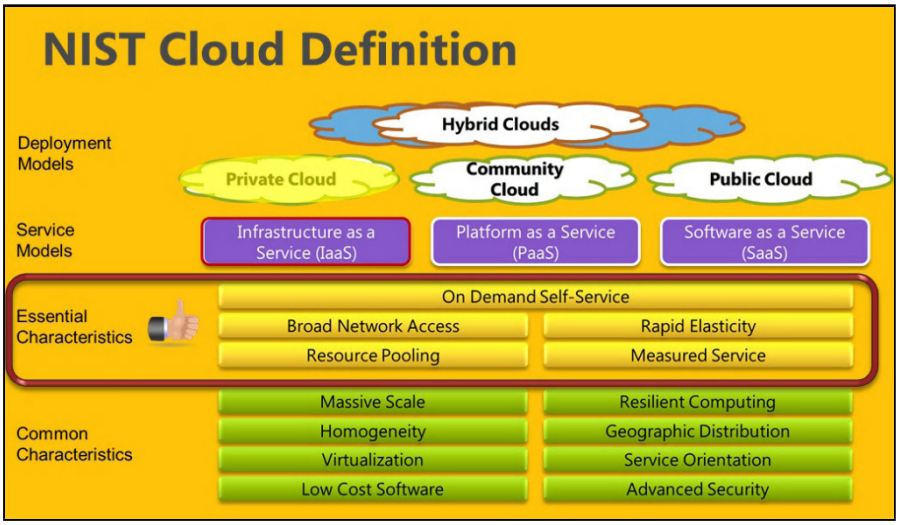


FIGURA 2

Sfruttando la tecnologia del Cloud Computing gli utenti collegati ad un cloud provider possono utilizzare software remoti non direttamente installati sul proprio computer e salvare dati su memorie di massa on-line predisposte dal provider stesso.
Il cloud computing rende disponibili all'utilizzatore le risorse (applicazioni, piattaforme ed infrastrutture) come se fossero una estensione delle risorse infrastrutturali o dei suoi sistemi "standard.

Gli attori del Cloud Computing

Gli attori del cloud computing, secondo la definizione del NIST (National Institute of Standards) sono l'Utilizzatore, il Fornitore, il Broker, l'Auditor e il Fornitore di rete come rappresentati e definiti nella figura 3.
L'utilizzatore (Cloud Consumer) è un individuo o un'organizzazione che acquisisce e utilizza i prodotti ed i servizi cloud.
Il fornitore (Cloud Provider) è il fornitore di servizi cloud. Il Cloud Broker funge da intermediario tra consumatore e fornitore (aiuterà i consumatori attraverso la complessità delle offerte di servizi cloud). Il Cloud Auditor fornisce una preziosa funzione intrinseca per la gestione conducendo il monitoraggio indipendente delle prestazioni e della sicurezza dei servizi cloud. Il Fornitore di rete (Cloud Carrier) è l'organizzazione che ha la responsabilità di trasferire i dati, in modo simile al ruolo del distributore di energia per la rete elettrica.

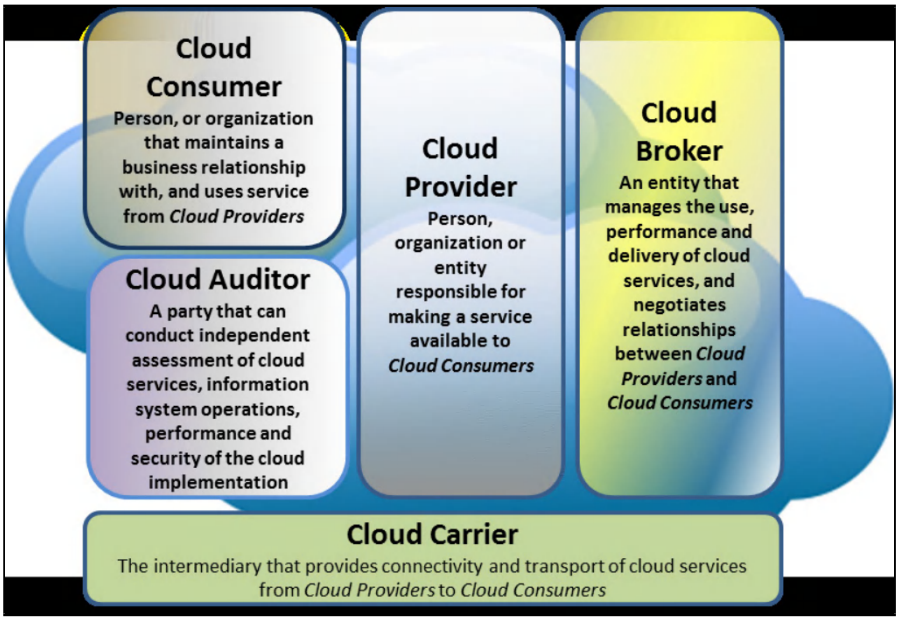


FIGURA 3

Le caratteristiche essenziali del Cloud Computing.

Per comprendere meglio la dinamica del cloud computing occorre rendersi conto delle caratteristiche fondamentali offerte da questa nuova tecnologia.

- On Demand. Il cloud computing è un sistema per erogare capacità di elaborazione, di storage, di database, di applicazioni e di altre risorse IT "on demand" ossia tramite una piattaforma ed un catalogo di servizi cloud via Internet con tariffe a consumo.
- Ampio accesso alla rete. Le funzionalità richieste sono rese disponibili e fruite dall'utilizzatore tramite la rete e sono accessibili tramite meccanismi standard che supportono l'utilizzo di piattaforme client eterogenee thin o thick (ad es. Telefoni cellulari, tablet, laptop e workstations).
- Pool di risorse. Le risorse informatiche del provider sono raggruppate per servire più consumatori utilizzando generalmente un modello condiviso o "multi-tenant", con risorse fisiche e virtuali diverse assegnate dinamicamente e riassegnate in base alla domanda dei consumatori.
- Servizio ottimizzato. I sistemi cloud controllano automaticamente l'utilizzo delle risorse sfruttando una capacità di misurazione con un livello di astrazione appropriato al tipo di servizio offerto. L'utilizzo delle risorse può essere controllato, verificato e segnalato, garantendo trasparenza sia per il fornitore che per il consumatore del servizio utilizzato.

I servizi offerti nel Cloud Computing.

Il NIST (National Institute of Standards) ha fatto una classificazione dei servizi a seconda del livel-

lo al quale sono collocati a partire dal livello hardware sino al livello applicativo (da infrastructure ad applications).
I principali servizi sono servizi di software, di piattaforma, di infrastruttura e di rete.
Nei paragrafi successivi vengono descritti i vari servizi mantenendo le dizioni de facto standard.

1. Software come servizio (SaaS)

Il sottoscrittore del servizio utilizza le applicazioni offerte dal provider che sono in esecuzione su un'infrastruttura remota e gestita dal provider stesso. Le applicazioni sono accessibili dai vari dispositivi client attraverso un'interfaccia thin client, tipicamente un browser Web.
SaaS è quindi un servizio che fornisce l'accesso al software e alle funzioni applicative offerte dal fornitore di servizi cloud attraverso internet. La gestione dell'applicazione e le attività di erogazione, monitoraggio e operations dell'infrastruttura sottostante sono a carico del Cloud Provider.
I servizi sono spesso offerti in sostituzione di applicazioni installate localmente dall'utente che esternalizza i suoi dati affidandoli al fornitore.
I benefici economici sono chiari: invece di pagare una tariffa anticipata per l'acquisto e / o il software di licenza, i clienti SaaS pagano una tariffa ricorrente (spesso mensile o annuale) per iscriversi al servizio.
I servizi più comuni offerti sono ERP, CRM, Email e Office Automation and Productivity, Unified Communication & Collaboration, Content Sharing, CRM, HR management fino ad arrivare all'ERP.

2. Piattaforma come servizio (PaaS)

Rappresenta l'insieme di soluzioni che il fornitore offre per supportare lo sviluppo e l'hosting di soluzioni applicative. Questo modello prevede che il fornitore metta a disposizione del cliente delle API (application programmer interfaces) attraverso le quali il cliente può sviluppare prodotti che interagiscono con il servizio.
Quindi questo servizio permette al consumatore di implementare nell'infrastruttura cloud le applicazioni create o acquisite utilizzando linguaggi di programmazione, librerie, servizi e strumenti supportati dal fornitore.

3. Infrastruttura come servizio (IaaS)

L'ultimo modello è quello dell' infrastruttura come servizio, cioè la capacità di fornire al consumatore le risorse informatiche di base (elaborazione, archiviazione, reti e altre risorse) con cui il consumatore è in grado di distribuire ed eseguire il proprio sofware. Il consumatore non gestisce o controlla l'infrastruttura cloud sottostante ma ha il controllo su sistemi operativi delle macchine (virtuali), sullo storage e sulle applicazioni distribuite, e possibilmente un controllo limitato di determinati componenti di rete (ad es. Firewall).
Mentre SaaS, PaaS e IaaS sono i tre tipi più comuni di servizi cloud, i fornitori di cloud computing a volte utilizzano anche altre etichette "come servizio" per descrivere le loro offerte. Ad esempio, alcuni offrono database come servizio (DBaaS), mobile back-end come servizio (MBaaS), funzioni come servizio (FaaS) o altri.
La figura 4 offre una visione di dettaglio dei servizi disponibili nel Cloud Computing.

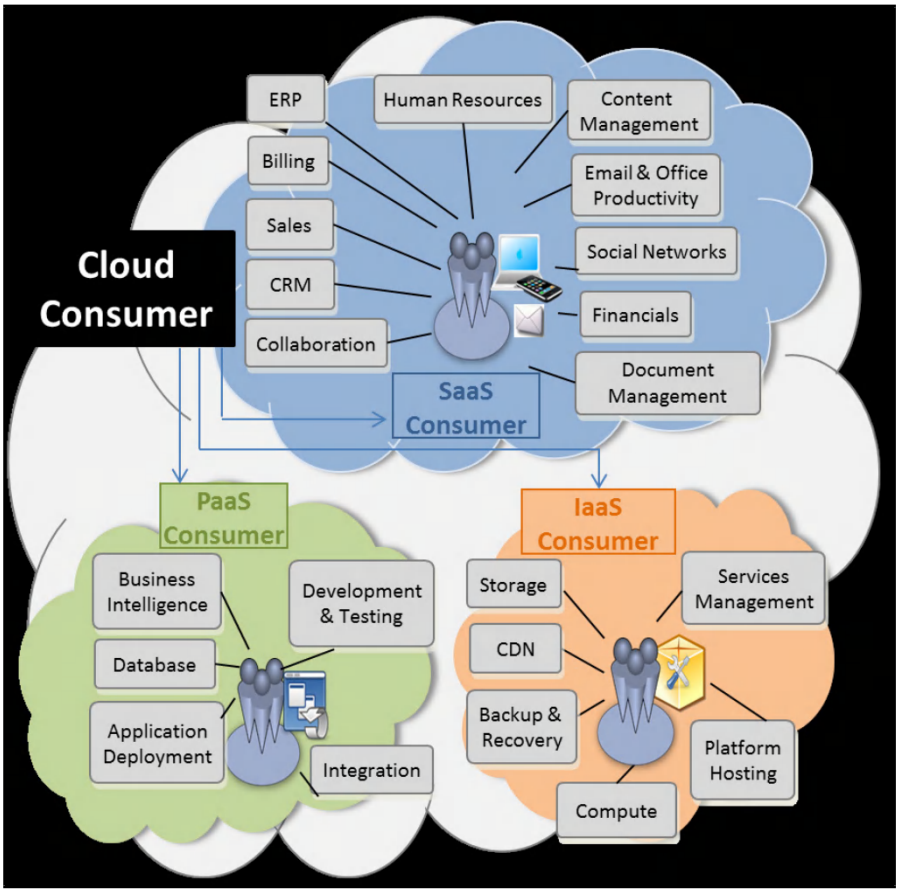


FIGURA 4

Tipologie di Cloud

Nell'ambito del Cloud Computing si distinguono quattro tipologie di cloud:
cloud privato, cloud pubblico, cloud ibrido ed il community cloud.

Cloud privato

L'infrastruttura cloud privata è un'infrastruttura informatica per lo più dedicata alle esigenze di una singola organizzazione e quindi fornita in uso esclusivo e può risiedere all'interno o all'esterno dell'organizzazione. Si possono paragonare ai tradizionali data centers salvo che le risorse infrastrutturali vengono offerte con un modello "a servizio". I servizi vengono erogati da servers che si trovano nel domino del cliente, che ha pieno controllo delle macchine sulle quali vengono conservati i dati e vengono eseguite le applicazioni. Il cloud privato in genere è sviluppato da grandi aziende che vogliono fornire servizi con il modello cloud ai vari dipartimenti o subsidiaries.

Cloud pubblico

Nel cloud pubblico l'infrastruttura Cloud è di proprietà di un fornitore specializzato nell'erogazione dei servizi che mette a disposizione degli utenti, aziende o amministrazioni i propri sistemi attraverso l'erogazione via web di applicazioni informatiche, di capacità elaborativa e di storage.
Il cloud pubblico è la forma più dominante di erogazione dei servizi ed è offerto dai grandi players dell'informatica.

Community Cloud

L'infrastruttura cloud è fornita per uso esclusivo di una specifica comunità di consumatori o da organizzazioni che hanno preoccupazioni condivise (ad es. Missione, requisiti di sicurezza, policy e considerazioni di conformità). Può essere posseduto, gestito da una o più organizzazioni della comunità, da una terza parte o da una loro combinazione.

Cloud ibrido

L'infrastruttura di cloud ibrido è una composizione di due o più infrastrutture cloud distinte (private o pubbliche) che rimangono entità uniche, ma che sono unite da una tecnologia standardizzata o proprietaria che consente la portabilità di dati e applicazioni.
Questa tipologia trova applicazione in molti settori di attività, dove non sempre è possibile che tutte le risorse siano disponibili su di un solo cloud pubblico.

Privacy nel Cloud computing

I fornitori di servizi cloud devono proteggere in modo sicuro la raccolta, l'elaborazione, la comunicazione e l'utilizzo delle informazioni personali (PI) e le informazioni personali identificabili (PII). Le informazioni personali identificabili sono le informazioni che possono essere utilizzate per rintracciare l'identità di un individuo, come nome, dati personali, dati biometrici, ecc., in combinazione con altre informazioni personali o identificative collegate o collegabili a un individuo specifico, come data e luogo di nascita, nome da nubile della madre, ecc.

Sicurezza nel Cloud computing

Data la complessità delle tecnologie e i diversi passaggi delle informazioni è necessario offrire soluzioni che affrontino le minacce alla sicurezza del Cloud. Molte delle minacce che i fornitori di cloud e i consumatori incontrano possono essere affrontate attraverso processi e meccanismi di sicurezza tradizionali come le politiche di sicurezza, crittografia, la gestione delle identità, i sistemi di rilevamento / prevenzione delle intrusioni, firewall applicativi e l' analisi delle vulnerabilità della supply chain.
Alcuni dei principali obiettivi di sicurezza per un fornitore di cloud computing dovrebbero includere:

- La protezione dei dati dei consumatori da accessi non autorizzati, da divulgazione e modifiche. Ciò include il supporto della gestione delle identità e delle politiche di controllo degli accessi per gli utenti autorizzati e quindi impedire l'accesso non autorizzato alle risorse dell'infrastruttura di Cloud computing.

- Evitare che i browser Internet utilizzino il cloud computing per ridurre il livello di sicurezza dell'utente finale. Ciò include l'adozione di misure per proteggere i dispositivi informatici personali connessi a Internet mediante l'applicazione di software di sicurezza, firewall personali e manutenzione delle patch.
- Implementare API standard per interoperabilità e portabilità in modo da permettere una facile migrazione dei dati ad un altro fornitore di cloud, se necessario.

Principali fornitori di Cloud Computing

Un breve accenno ai principali fornitori di servizi Cloud.
Amazon Web Services, resta un attore importante in quest'ambito fornendo servizi di elaborazione, storage di database, distribuzione di contenuti e molto altro.
Ibm Cloud racchiude oltre 100 servizi di IBM e di terze parti che consentono di potenziare infrastrutture e applicazioni.
Microsoft Azure è presente sul mercato con tantissimi servizi cloud che garantiscono strumenti end-to-end in ambienti cloud pubblici e ibridi.
Negli anni, Google, con la sua Google Cloud Platform ha realizzato una piattaforma per gestire intensi carichi di lavoro, utilizzando tecnologie di gestione avanzata dei dati.
Oracle, fornitore di soluzioni software e servizi, ha rinnovato completamente la propria offerta in ottica cloud, puntando al mission critical cloud.
Sul fronte nazionale, si distingue l'offerta di Tim, carrier che può basarsi su rete proprietaria, che è particolarmente orientata alle esigenze delle Pmi.

CONCLUSIONE

I principali benefici del Cloud computing si possono così riassumere:

Costi

Il Cloud computing elimina le spese in conto capitale per l'acquisto di hardware e software per la creazione di data centers, sostituendole con canoni di servizio (passaggio da CAPEX a OPEX). Le soluzioni cloud sono particolarmente appetibili per le piccole e medie imprese a cui vengono offerti servizi aventi lo standard delle grandi imprese che mai potrebbero avere con uno sviluppo in proprio.

Flessibilità

I vantaggi dei servizi di Cloud computing includono la capacità di scalare elasticamente il Cloud peak, cioè fornire la giusta quantità di risorse (più o meno potenza di calcolo, di storage, di larghezza di banda) quando è necessario, e dalla giusta posizione geografica.

Produttività

I data center in-house in genere richiedono un grande ammontare di "racking e stacking": installazione di hardware, patching software e altri compiti di gestione IT che richiedono tempo e risorse. Il Cloud computing elimina la necessità di molte di queste attività, in modo che i team IT degli

utilizzatori possano dedicare più tempo al raggiungimento degli obiettivi aziendali più importanti.

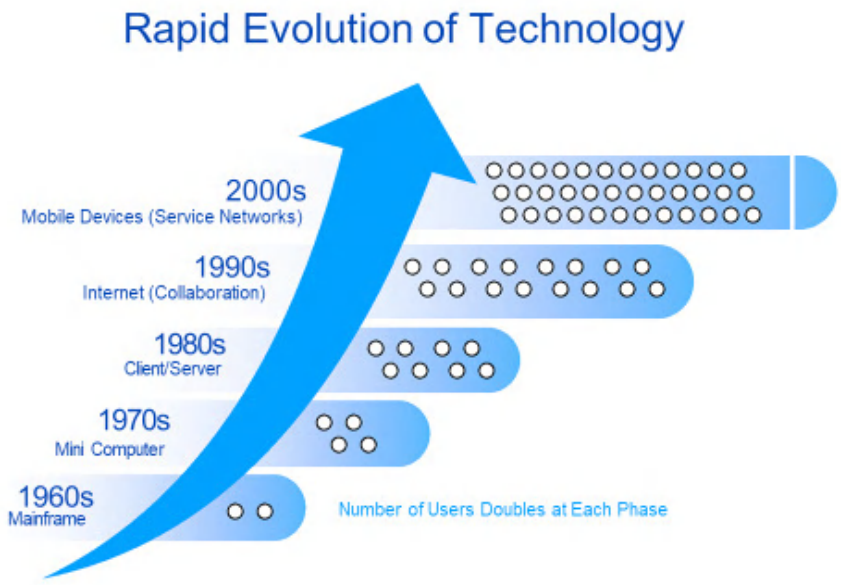
Prestazione

I maggiori servizi di cloud computing operano su una rete mondiale di data center sicuri, che vengono regolarmente aggiornati all'ultima generazione di hardware di elaborazione veloce ed efficiente. Ciò offre numerosi vantaggi rispetto a un singolo data center aziendale, tra cui una ridotta latenza di rete per le applicazioni e maggiori economie di scala.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 2

INTERNET DELLE COSE (IoT)

L'internet delle cose è la risultante dei due grandi fenomeni che hanno caratterizzato l'evoluzione dell'informatica; la rapidissima evoluzione delle tecnologie elettroniche e comunicazione e l'affermarsi di internet.
Già negli anni '90 con i trends della miniaturizzazione e con l'affermarsi della legge di Moore, si cominciò ad avere la visione dell' "Ubiquitous Computing", ossia quella di avere una molteplicità di computers inseriti in una moltitudine di oggetti. Da allora è proseguito lo sviluppo di sistemi di elaborazione sempre più piccoli e potenti e e lo sviluppo di sensoristica avanzata.



In parallelo Internet ha subito un'evoluzione formidabile in termine di sviluppo e di presenza capillare. Per IOT si intende quindi l'estensione di Internet al mondo degli oggetti.
Internet è il canale fondamentale per la condivisione delle informazioni provenienti dagli oggetti connessi.
Nell'Internet delle cose, gli oggetti o apparati sono prodotti costituiti in generale da sensori, attuatori e controllori con la capacità di comunicazione e di codifica delle informazioni.
Gli oggetti dell'IOT hanno delle caratteristiche comuni e delle peculiarità in dipendenza del tipo di

applicazione. Più in dettaglio la parte "elettronica" è composta da tre componenti fondamentali: sensori, attuatori e microcontrollori.

- I sensori riportano le informazioni nell'apparato in base a rilevazioni effettuate su grandezze fisiche misurabili. Si tratta, per dare un'idea, di sensori di temperatura, sensori di movimento, videocamere, rilevatori di luminosità, wearable (oggetti da indossare), sensori ambientali, territoriali e tanti altri. Un accenno particolare va fatto ai sensori virtuali realizzati tramite "fusion" di informazioni ricavate dai sensori tradizionali e informazioni di contesto, ad esempio sull'area monitorata o altre sorgenti di dati.
- Gli attuatori generano gli elementi di uscita dei devices, come i motori, ecc. che consentono agli apparati di compiere azioni sul mondo esterno.
- I microcontrollori sono il cervello dei dispositivi. Senza entrare nel dettaglio dei Microcontrollori, argomento che verrà sviluppato dal settore Microelettronica, qui verranno evidenziate le caratteristiche più tipiche per un progetto di IOT.

Negli apparati dell'internet delle cose si utilizzano per loro natura le soluzioni più integrate e miniaturizzate e molto spesso si utilizzano SoC (System on Chip), ossia sistemi che incorporano processore, RAM ed unità di storage in un singolo chip.
Le funzionalità avanzate dei SoC richiedono un sistema operativo per gestire i vari eventi; esistono vari tipi di sistemi operativi sia proprietari che open source forniti dai produttori di soluzioni embedded e dai principali produttori di sistemi operativi quali Microsoft e Linux.

Altri elementi da tenere in considerazione per un progetto IOT sono le prestazioni del Microcontrollore includendo la capacità low power, per ridurre i consumi e prolungare la durata della batteria, e la dimensione della/le RAM.

Connessione in rete.

La modalità di connessione in rete rappresenta il fattore determinante per ogni prodotto dell'internet delle cose; di seguito vengono elencate le diverse tecnologie.

Radio Frequency Identification (RFID) passivo

È la tecnologia più semplice con cui un oggetto può integrarsi nell'Internet of Things. Raggruppa tutti gli standard di identificazione automatica in radiofrequenza che non richiedono la presenza di una batteria a bordo dell'oggetto. L'RFID passivo, nella sua declinazione UHF EPC Gen 2 per la gestione della supply chain, rappresenta il contesto in cui è nato e si è inizialmente sviluppato il concetto di Internet of Things. Tuttavia, i suoi utilizzi per soluzioni di supply chain non limitate a un singolo attore rimangono ancora spesso a livello sperimentale.

RFID attivo

Fornisce funzionalità addizionali rispetto all' RFID passivo grazie all'utilizzo di una batteria, che consente di migliorare le prestazioni di comunicazione (distanza di lettura) e di abilitare un funzionamento autonomo, senza necessità di interrogazione da parte del lettore.

Personal Communication

Raggruppa standard per la comunicazione in reti a corto raggio (PAN, Personal Area Network) pensate per applicazioni consumer e caratterizzate da bande di comunicazione molto strette (come ad esempio Bluetooth low-energy, NFC13). Vi è un crescente utilizzo della Personal Communication in ambito eHealth, principalmente per la disponibilità di dispositivi personali (smartphone, tablet) già dotati di queste tecnologie, che vengono sfruttati sia come concentratori che per la visualizzazione e la storicizzazione delle informazioni. Fondamentale per l'affinità con i telefoni cellulari è il protocollo Bluetooth identificato dallo lo standard IEEE 802.15.4 e, soprattutto, dalla recente evoluzione IEEE 802.15.4e (Bluetooth LE), in grado di incrementare notevolmente l'affidabilità dei collegamenti a radio frequenza e l'efficienza energetica, grazie all'adozione del meccanismo di accesso Time Slotted Channel Hopping.

Wireless Bus

Questi standard (che includono ad esempio il Wireless M-Bus, KNX, X10) si propongono come alternativa "senza filo" a soluzioni cablate già utilizzate da tempo nel mondo industriale. Le tecnologie appartenenti a questo cluster non consentono architetture di comunicazione sofisticate, dal momento che replicano i principi dei bus di campo. La tecnologia più diffusa è rappresentata dal Wireless M-Bus, su frequenza 169 MHz, che consente di contenere i consumi energetici e al contempo avere buone distanze di lettura, in modo da ridurre il numero di concentratori necessari. Per le sue caratteristiche, il Wireless Bus vede il suo utilizzo principale nello Smart Metering non elettrico: è ormai lo standard di fatto per il gas, ed è plausibile che lo diventi anche per l'acqua qualora si decidesse di intraprendere questa direzione.

Wi-Fi

Si tratta di protocolli che consentono l'accesso wireless a reti locali a banda larga. Essendo stati sviluppati per trasmettere una mole ingente di dati, hanno elevati consumi energetici, il che comporta forti limitazioni di applicabilità in campo IoT. Viene utilizzato principalmente per la localizzazione indoor di persone e oggetti e per applicazioni di logistica, controllo della produzione e sicurezza (intesa nell'accezione di "safety", ovvero di prevenzione da infortuni e calamità). I contesti di impiego sono potenzialmente molto numerosi: da applicazioni di domotica, al monitoraggio delle condizioni ambientali (ad esempio luminosità, umidità del terreno), fino ad arrivare ad applicazioni di telemonitoraggio di parametri vitali o della corretta assunzione di farmaci.

Reti Mesh Low-Power (RMLP)

Sono reti formate da nodi low-power e caratterizzate da architetture di rete complesse, autoconfiguranti, in grado di supportare l'instradamento dinamico dei dati e ottimizzate per un basso consumo energetico (come ad esempio ZigBee, WHart). Vi è attualmente un grande fermento su queste tecnologie, ritenute uno degli assi portanti dello sviluppo dell'IoT.

Reti cellulari

Si tratta delle consuete tecnologie di comunicazione cellulare, ovvero GPRS, GSM (2G), HSPA (3G),

LTE (4G). In considerazione dell'elevato consumo energetico, trovano applicazione soprattutto in quei casi in cui è possibile alimentare i nodi, oltre che in combinazione con RMLP e Wireless Bus per la comunicazione tra i dispositivi di secondo livello (concentratori) e i centri di controllo. Sono largamente impiegate nei trasporti (Smart Car, Smart Logistics, traposto pubblici) e più in generale in quelle applicazioni che richiedono una connessione punto a punto, con oggetti che possono essere facilmente alimentati. In aggiunta a ciò, le reti cellulari trovano impiego per la comunicazione tra i dispositivi di secondo livello (concentratori) e i centri di controllo .

LORA,SIGFOX e 5G

Le caratteristche comuni di queste tecnologie sono un ridotto impatto energetico (sono pensate per dispositivi prevalentemente alimentati a batteria) e basso bit rate, per alcuni bassissimo: SIGFOX ad esempio consente scambio di messaggi di dimensione della decina o centinaia di byte.
Il 5G, che sarà descritto in dettaglio nella tecnologia prioritaria reti e servizi radiomobili, in tale contesto è fondamentale per la riduzione della latenza fondamentale per esempio nel contesto delle Connected Cars.

PLC (Power Line Communication)

In questo scenario, la trasmissione delle informazioni avviene mediante la modulazione del segnale elettrico utilizzato per l'alimentazione. Vi sono sia protocolli pensati per il mondo residenziale che per la rete di media e alta tensione: la principale differenza riguarda la distanza massima di comunicazione e il data-rate supportato. La rete più diffusa di oggetti connessi in Italia è basata su PLC: si tratta degli oltre 34 milioni di Smart Meter elettrici.

LE PIATTAFORME DI SVILUPPO

Per lo sviluppo di un sistema IOT è di fondamentale importanza la scelta della piattaforma di sviluppo, sia nella fase prototipale che in quella finale. Di seguito vengono elencate le piattaforme commerciali di rapid prototyping più utilizzate.
Arduino, è certamente tra le più significative. Nata e sviluppata ad Ivrea da un gruppo di docenti dell'IDII,è una scelta raccomandata per la varietà di schede Hardware, per il supporto e per documentazione. Arduino è completamente un open hardware: il sistema operativo non esiste propriamente ma Arduino fornisce un booster per real time operating system, come per esempio freeRTOS.

Il linguaggio di programmazione di Arduino è un C++, modificato.
Mentre Arduino si rivolge prevalentemente ad un pubblico di hobbysti, la famiglia di componenti **Nucleo** di Stmicroelettronics si rivolge ad una utenza principalmente industriale e permette un ulteriore passo verso la realizzazione di prototipi industrializzabili, offrendo una vasta e continuamente in crescita pletora di boards specializzate per diverse applicazioni e l'indispensabile corredo di SW che include esempi applicativi end to end completi. Qualora i numeri lo giustificassero, è poi possibile ipotizzare la realizzazione di componenti dedicati, consentendo di ottenere economie di scale combinate a tempistiche ridotte.

Un'altra piattaforma, molto diffusa è **Raspberry PI**. L'idea del suo fondatore, nata dall'esperienza Acorn in UK, consiste nella realizzazione di un computer piccolo utilizzato per fare esperimenti didattici. Rasperry nella sua evoluzione è divenuto un computer programmabile con un sistema operativo di tipo Llinux ed un numero sufficente di add-ons.
Infine nel campo delle piattaforme occorre segnalare **Electric IMP**, piattaforma meno matura, ma che con la sua evoluzione potrà essere utilzzata specialmente nel mercato consumer.

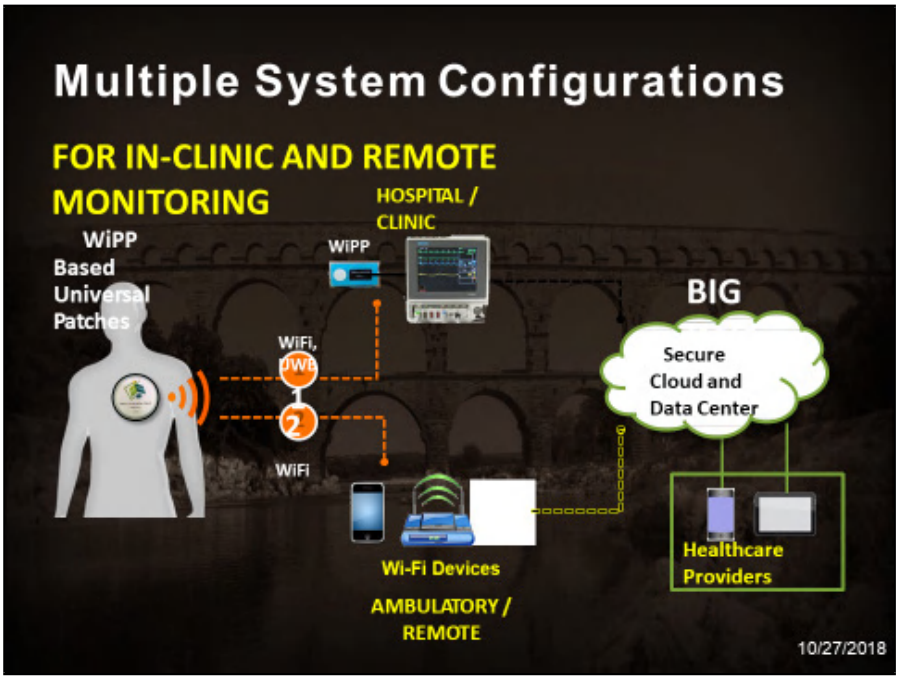
SICUREZZA DEI SISTEMI IOT

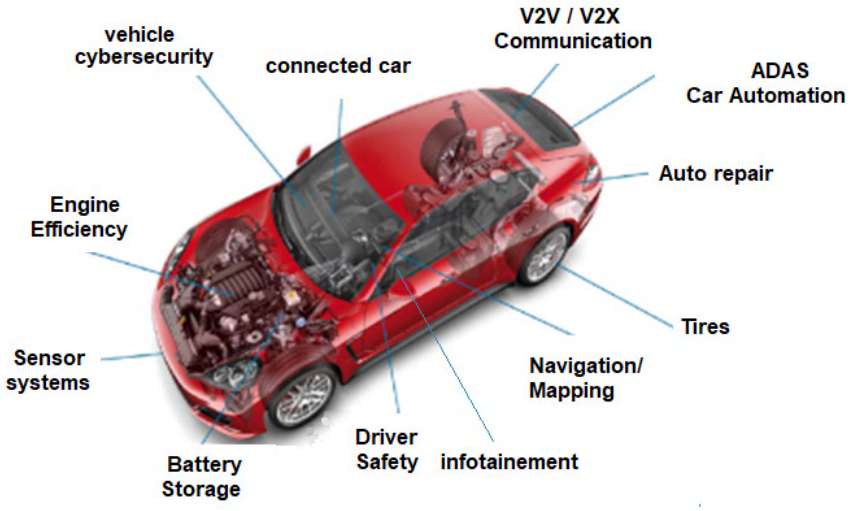
Il tema della sicurezza dei sistemi IoT è ampliamente trattato nella tecnologia prioritaria 8, Internet e la sua sicurezza che, per comodità, qui riportiamo integralmente.
Il concetto dell' "Internet of Things" (IoT) è stato introdotto quasi vent'anni fa. Tuttavia, il suo effettivo impiego è iniziato negli ultimi anni, e il problema della sicurezza dei dispositivi connessi è entrata all'ordine del giorno solo recentemente, dopo aver visto che la maggior parte dei dispositivi connessi a Internet sono sprovvisti di una sicurezza robusta. A volte mancano i blocchi di sicurezza più basilari.
Secondo uno studio di Marsh (Global Risk Report 2018), gli oggetti connessi a Internet nel 2017 sono stati 8,4 miliardi, e si stima che essi raggiungeranno i 20 miliardi nel 2020 (dati Gartner). Uno studio di Symantec, inoltre, rileva che un dispositivo IoT viene mediamente attaccato una volta ogni due minuti in alcune fasce orarie "di punta".
Oggetti che prima non erano pensati per essere connessi, ora si ritrovano esposti a possibili vulnerabilità che possono essere sfruttate in vari modi: dai più classici attacchi di tipo Denial of Service (DoS) o Distributed Denial of Service (DDoS), fino ad attacchi che possono mettere a rischio la vita umana (in particolare nel caso di dispositivi medici come pacemaker connessi), passando per il controllo remoto di sistemi di guida autonoma o dei sistemi di distribuzione di luce, gas e acqua.
Gli aspetti interessanti dal punto di vista della ricerca si possono racchiudere in tre grandi aree.
Da un lato è importante precludere a un attaccante di poter accedere allo stato interno di un dispositivo IoT, come ad esempio le chiavi crittografiche utilizzate nella comunicazione con altri dispositivi. Occorre studiare quindi possibili attacchi di tipo side-channel o fault, in cui un attaccante è in grado di ricavare la chiave segreta o altri parametri di sicurezza di un dispositivo IoT inferendo dall'analisi di grandezze come il consumo di potenza o di emissione elettromagnetica, oppure generando di proposito dei guasti nel dispositivo.
Dall'altro lato è importante proteggere la comunicazione tra i vari dispositivi IoT. Per connettere questi dispositivi tra di loro vengono principalmente utilizzate connessioni di tipo radio: dall'ormai consolidato Bluetooth ai più recenti 6LowPAN e LoRA, andando verso le reti 5G. È importante studiare queste tecnologie e caratterizzarle dal punto di vista della sicurezza, per scoprire in anticipo possibili vulnerabilità sfruttabili da malintenzionati per decifrare dei messaggi di una comunicazione tra dispositivi o alterarne il contenuto.
Le nuove versioni dei protocolli TLS, usato per la sicurezza end-to-end tra dispositivi che comunicano su una rete TCP/IP, e WPA, che fornisce protezione alle reti Wi-Fi, sono state completamente riprogettate per venire incontro a problemi di sicurezza delle loro versioni precedenti, come per

esempio l'attacco KRACK per il protocollo WPA2 scoperto a fine 2017. Ma le scelte implementative sono state fatte anche per ritagliare meglio queste tecnologie a dispositivi IoT. Con l'ultima versione del protocollo TLS (1.3) è stato raggiunto un miglioramento in termini di sicurezza e velocità, ma le sfide nel suo utilizzo in ambito IoT sono ancora tante: basti pensare all'autenticazione tramite certificati le cui dimensioni possono andare oltre al Kilobyte, al peso computazionale richiesto dai più importanti algoritmi crittografici.
È importante quindi focalizzare lo studio su come questa tecnologia possa inserirsi in un contesto vincolato come quello dell'IoT, senza ridurre la sicurezza del dispositivo connesso.
Uno dei problemi maggiori nell'ambito della sicurezza dell'IoT, infine, è il fatto che le funzioni crittografiche più utilizzate oggigiorno richiedano un peso computazionale e di memoria eccessivo rispetto a quanto possono fornire i dispositivi connessi. Una soluzione utilizzata, e in cui la ricerca è molto attiva, è quella di usare coprocessori hardware in grado di accelerare notevolmente queste funzioni.
La ricerca di soluzioni per la sicurezza dell'IoT passa anche dalla definizione di nuove funzioni crittografiche. Il NIST ha recentemente aperto un concorso per standardizzare nuovi algoritmi crittografici "leggeri" (lightweight cryptography) che possano essere utilizzati in ambienti estremamente vincolati in termini di risorse. "

APPLICAZIONI DELL'INTERNET DELLE COSE

La continua miniaturizzazione combinata con la crescente la disponibilità di piattaforme per le varie esigenze stanno portando come conseguenza ad una capillare diffusione dell'IoT.
Le potenzialità dell'IOT si estendono a qualsiasi settore: dalle imprese coinvolte nel processo di trasformazione delle proprie fabbriche e supply chain (Industrial IoT), alle Amministrazioni Pubbliche che necessitano sempre più di attivare nuove collaborazioni con gli attori privati per la realizzazione di vere e proprie Smart City, fino ai consumatori, sempre più orientati all'acquisto di nuove soluzioni smart per la casa (Smart Home), l'auto (Smart Car).
Un capitolo a parte è la presenza di sensori e dispositivi nel campo della salute, che stanno portando ad una ristrutturazione dell'intero settore. Per fare ciò occorre saper tenere il passo e attuare le giuste strategie per affrontare al meglio la crescente evoluzione tecnologica in atto, dal potenziale enorme e in larga parte ancora inesplorato.
Occorre infine segnalare due settori in cui l'internet delle cose porterà ad una rivoluzione copernicana. Il primo settore è quello dell'assistenza medica che, come evidenziato nell' illustrazione successiva, rivoluzionerà il modo di fare prevenzione e di curarsi.
Il secondo settore è quello dell'automotive con il nuovo paradigma di "self driving car" o auto a guida autonoma, che rivoluzionerà il mondo della mobilità. soprattutto se unita ai nuovi modelli di business (es. mobility on demand) ed alle nuove tecnologie (es. auto elettrica).
In entrambi questi casi (Health ed Automotive) è necessario ricordare che il progresso tecnologico deve essere recepito ed armonizzato da un sistema legislativo e regolatorio che sia in grado di prevedere uno scenario attuativo di durata adeguata.


Multiple System Configurations
FOR IN-CLINIC AND REMOTE MONITORING
HOSPITAL / CLINIC
WiPP Based Universal Patches
WiPP
WiFi, UWB
WiFi
BIG
Secure Cloud and Data Center
Healthcare Providers
Wi-Fi Devices
AMBULATORY / REMOTE
10/27/2018


vehicle cybersecurity
connected car
V2V / V2X Communication
ADAS Car Automation
Auto repair
Engine Efficiency
Tires
Sensor systems
Navigation/ Mapping
Driver Safety
infotainement
Battery Storage

Considerazioni conclusive su IoT

Come già accennato nel profilo di Settore, il 2018 è stato un anno molto positivo per l'Internet delle cose, sia in Italia che a livello internazionale. È proseguita a ritmi sostenuti la crescita del mercato, in termini di valore e maturità dell'offerta con nuovi player globali che giocano sempre più un ruolo di primo piano nel mercato; si espandono le nuove reti LPWA (Low Power Wide Area), a cui si affiancano le prime sperimentazioni sul fronte 5G; proliferano le startup, con offerte spesso complementari a quelle delle grandi aziende; evolvono le strategie per valorizzare i dati raccolti, con Privacy, Cyber Security e i nuovi algoritmi di Intelligenza Artificiale che si pongono sempre più tra gli aspetti cruciali a cui le aziende devono guardare per favorire lo sviluppo di soluzioni affidabili e attrattive sul mercato.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 3

BIG DATA E DATA SCIENCE

I dati digitali sono i dati prodotti, elaborati e scambiati nel World Wide Web (Web nel seguito), nelle reti sociali, nei sistemi informativi pubblici e delle aziende e in generale in ogni sistema che rappresenti i dati mediante fenomeni fisici che adottano un alfabeto binario. La loro diffusione sta crescendo negli ultimi anni a ritmi sempre più intensi. Per fornire un solo indicatore, i dati scambiati sul Web raddoppiano in dimensione ogni anno e mezzo, dando luogo ad una crescita esponenziale dei dati digitali nel tempo, quale mai si è verificata per la informazione e la conoscenza nella storia della umanità. Ciò dà luogo all'utilizzazione dei dati digitali in tutti i settori produttivi, nei servizi e nella ricerca scientifica, ma, allo stesso tempo, ad una presenza sempre più intensa e intrusiva nella vita della singole persone, delle aziende e delle comunità sociali, creando grandi opportunità e problemi nuovi per gli individui e le società.

Le tecnologie dell'informazione (vedi Figura 1) con la loro rapida evoluzione alimentano in modo imponente questo processo; tra le altre le cinque considerate più rilevanti (Grefen, 2016) sono il mobile computing, il cloud computing, l'Internet of things, i social media, tecnologie che tutte insieme contribuiscono alla esplosione dei dati digitali, fenomeno cui viene anche dato il nome di Big Data.

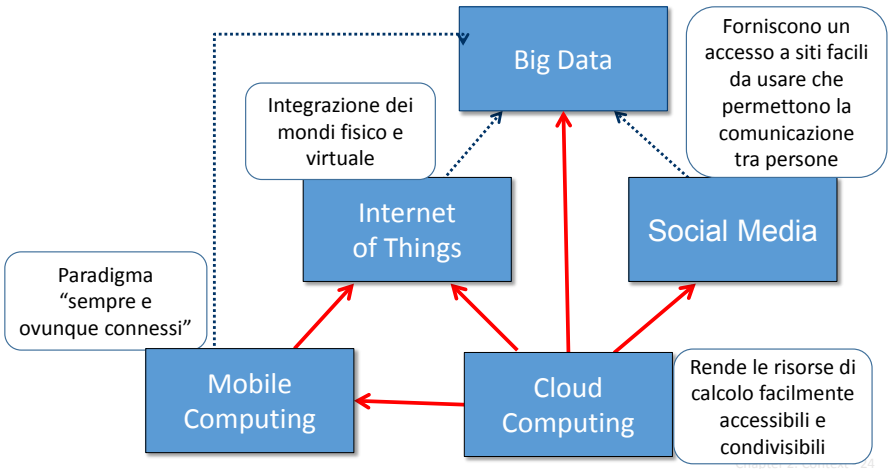


FIGURA 1 - LE "BIG FIVE", TECNOLOGIE CHE HANNO CREATO IL GRANDE FENOMENO DELLA DIGITALIZZAZIONE

La capacità sempre più ampia dei dati nel rappresentare il mondo evolve secondo tre coordinate (vedi Figura 2): la profondità della conoscenza sulla realtà osservata (ad es. la conoscenza sul

sequenziamento del genoma umano), l'ampiezza della realtà osservata (ad es. il crescente numero di persone per cui è stato sequenziato il genoma), e la loro evoluzione nel tempo (ad es. la dinamica in tempo reale della posizione degli aerei in un aeroporto).

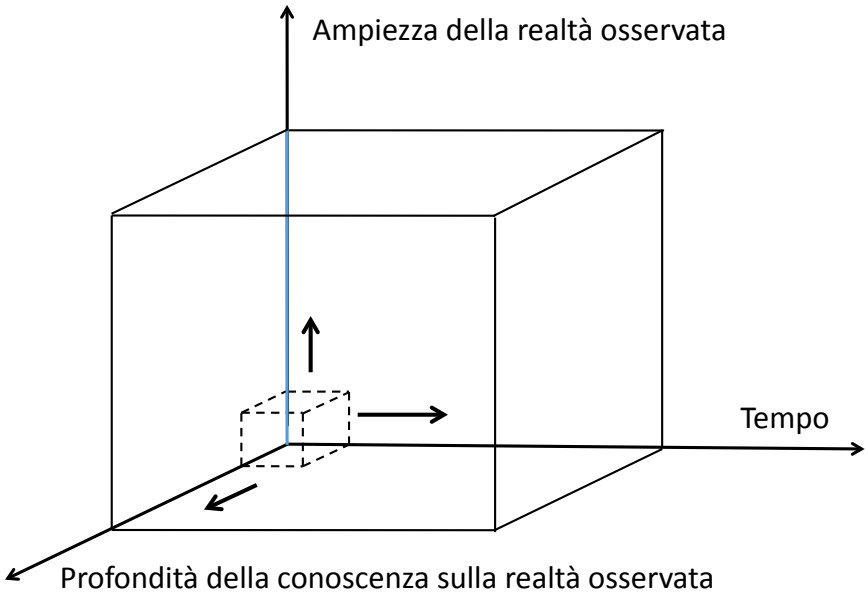


FIGURA 2: DAGLI SMALL DATA AI BIG DATA

Le principali caratteristiche che caratterizzano i Big Data sono:

- il volume, con riferimento alla dimensione dei dati nell'ambito delle tre coordinate viste sopra (ciò porta a usare il termine Big Data);
- la velocità, intesa come tasso di generazione e trasmissione dei dati nella unità di tempo;
- la varietà, in termini di eterogeneità dei tipi di dati.

Diverse definizioni sono state date del termine Big Data. Una definizione è del McKinsey Global Institute: "Un sistema di Big Data si riferisce a dataset la cui taglia/volume è talmente grande che eccede la capacità dei sistemi di database relazionali di catturare, immagazzinare, gestire ed analizzare".

Il termine "Big Data" fa dunque riferimento genericamente all'insieme crescente per volume, velocità e varietà dei dataset digitali disponibili e alle tecnologie che si stanno sviluppando per la loro gestione. Il corpo di conoscenze che si sta formando sull'insieme di tecniche, modelli, metodologie, tecnologie prende il nome di Scienza dei Dati; tale scienza naturalmente può applicarsi a qualunque insieme di dati, sia small data che Big Data.

Come accade per molte scienze nella loro fase di formazione, anche la Scienza dei dati, essendo

in fase nascente, sta costruendo il suo corpus di competenze a partire dalle scienze esistenti. La Matematica e la Statistica si occupano dei dati e delle loro simbolizzazioni e modelli da molto tempo, e l'Informatica da più di mezzo secolo; molte altre aree culturali, quali le Scienze sociali, l'Economia, le Scienze cognitive, le Scienze giuridiche stanno fornendo teorie, metodi e modelli interdisciplinari utili al formarsi della Scienza dei dati, contribuendo tutte insieme alla diffusione della cultura dei dati digitali. La Scienza dei dati si caratterizza perciò rispetto alle altre science per la focalizzazione su alcuni paradigmi ereditati da diverse discipline che è ora necessario investigare insieme nelle loro interazioni. Allo stesso tempo, essa influenza altre aree culturali; ad esempio, nella Economia si sta formando la nuova disciplina della Economia digitale, caratterizzata da leggi e modelli nuovi rispetto alla Economia classica.

IL CICLO DI VITA DEL DATO DIGITALE

Il ciclo di vita dei dati elaborati a fini di analisi nei sistemi informativi classici è composto di una fase di estrazione (Extract) dei dati dalle basi di dati utilizzate dai processi operativi, una fase di trasformazione (Transform) e integrazione dei dati, e una fase di caricamento (Load) dei dati nel sistema di analisi. Rispetto al ciclo di vita tradizionale dei dati, quello dei Big Data è più articolato e complesso.

La premessa al ciclo di vita del dato digitale è la formulazione di un problema, che può consistere nel prendere una decisione, comprendere le ragioni di un evento o un fatto, classificare un insieme di artefatti, predire un evento futuro. È questo il momento in cui occorre capire quale è il fenomeno (o variabile) in output, e quali sono le variabili in input alla funzione che esprime la decisione, interpretazione o predizione. Ad esempio, lo strumento Breezometer (www.breezometer.com), che utilizzeremo nel seguito come esempio comune alle varie fasi, permette di prevedere quale sarà il livello di inquinamento (variabile di output) in un'area geografica.

La seconda fase consiste nella scelta delle fonti dei dati corrispondenti alle variabili in input, e la raccolta dei dati. In Breezometer si raccolgono dati satellitari, dati sul traffico automobilistico, sul consumo energetico, la rete stradale, l'ambiente, il territorio considerato (descritto ad esempio con Google Maps). Le fonti individuate potrebbero non essere sufficienti a descrivere le variabili del problema, questo porta a individuare un nuovo modello "variabili di input – variabile di output", ovvero un nuovo problema che approssima il precedente. I dati vanno anche raccolti; se caratterizzati da un flusso continuo come negli streaming data, vanno filtrati, memorizzati e trasformati in serie temporali, per essere elaborati solo successivamente. In alcune applicazioni, ad es. le quotazioni di borsa, i dati vanno elaborati in tempo reale. Nelle reti di sensori, i dati vanno consolidati in un unico luogo fisico e logico.

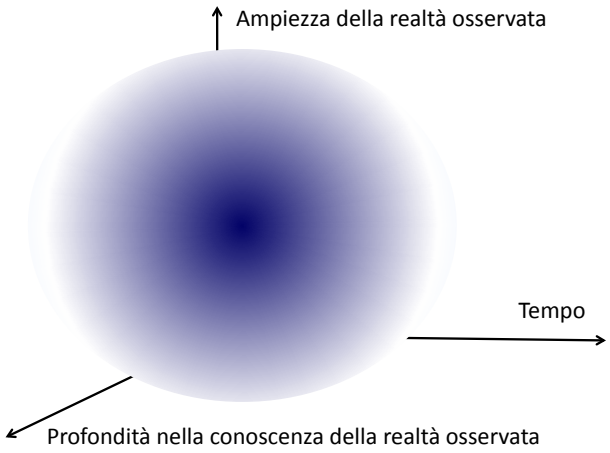
LA FASE DI GESTIONE O PREPARAZIONE

Siamo giunti alla terza fase del ciclo di vita del dato, la fase di gestione. Sotto questo termine si collocano diverse attività, che hanno tutte lo scopo, come si usa anche dire, di preparare il dato per la fase successiva di analisi e formulazione del modello risolutivo del problema posto all'inizio. È usualmente la fase più dispendiosa del ciclo di vita, e può corrispondere fino all'80 per cento dello sforzo complessivo.

La fase di gestione, in particolare, è la fase in cui occorre governare i problemi connessi alla varietà ed eterogeneità dei tipi (o rappresentazioni) dei dati, i principali tra i quali sono: le tabelle o relazioni, i grafi, le mappe geografiche, i testi in formato libero, i testi strutturati, le immagini, i video. Ci soffermiamo ora sulle tabelle e sui grafi; le tabelle sono il tipo di dati adottato da molto tempo nei sistemi di gestione di basi di dati tradizionali, e furono introdotte da Ted Codd per offrire all'utente una rappresentazione di "spartana semplicità", superando le rappresentazioni gerarchiche e collegate dei primi sistemi di gestione. I sistemi informativi classici, che usano nei processi operativi applicazioni transazionali (es. prenotazione posti) e nei processi decisionali tecnologie di data warehouse, utilizzano prevalentemente dati prodotti internamente alla organizzazione.
Nel Web i dati possono essere illimitatamente condivisi, non ci sono gerarchie, tutti gli utenti sono potenzialmente parte di una comunità tra pari. Il fenomeno della condivisione dei dati sul Web porta necessariamente a adottare rappresentazioni dei dati che possano fare riferimento le une alle altre, creando così una rete, un arcipelago di dati a partire da dataset isolati. Ciò porta al diffondersi di rappresentazioni cosiddette di linked open data, che adottano strutture a grafo che permettono di collegare dataset pubblicati sul Web da fonti e in momenti diversi. Ci torneremo più avanti.
La fase di gestione è composta di diversi passi:

- Valutazione e miglioramento della qualità
- Trasformazione
- Arricchimento semantico
- Integrazione
- Eliminazione dei dati non rilevanti.

Riguardo alla qualità dei dati, la inarrestabile crescita dei dati prodotti nel mondo digitale può essere rappresentata (vedi Figura 3) come una sfera che si espande nel tempo e nello spazio della realtà osservata.



Nei Big Data, dunque, una rappresentazione precisa ma circoscritta di un insieme di fatti può trasformarsi in una rappresentazione opaca e sfocata, affetta da errori. L'immagine della sfera è anche utile per farci capire che, a seguito dei nostri limiti cognitivi, un ampliamento della conoscenza dei fenomeni, può portarci a conoscere di una realtà complessa frammenti sempre più circoscritti e imprecisi.

I dati, peraltro, possono essere il risultato di una misura di fenomeni fisici, nel qual caso sono soggetti ad errori, che corrispondono alla approssimazione nella misura o a guasti o malfunzionamenti nello strumento di misura. Nel passo di valutazione e miglioramento della qualità dei dati si controlla la qualità dei dati per mezzo di un insieme di dimensioni (vedi anche Batini e Scannapieco, 2016), in termini di:

- accuratezza, intesa come aderenza del dato al fenomeno osservato,
- completezza, l'estensione con cui il dato rappresenta la realtà osservata,
- tempestività di aggiornamento, la rapidità con cui cambiamenti nel fenomeno osservato corrispondono ad aggiornamenti del dato,
- consistenza del dato con un insieme di regole logiche definite per rappresentarne le proprietà.

Valutare la qualità del dato è il passo propedeutico a migliorarne la qualità. Per la prima volta, vediamo che per poter operare sul dato per un certo fine dobbiamo ampliare la nostra conoscenza attorno al dato; qui, per comprendere ad esempio qual è il valore corretto del dato "Cinsello Balamo" che rappresenta un comune italiano, dobbiamo confrontarlo con l'elenco dei comuni italiani e cercare quello più "vicino", dove la vicinanza è rappresentata ad esempio dal numero minimo di aggiunte, cancellazioni e modifiche dei caratteri che dobbiamo effettuare per trasformarla nel nome corretto di un qualunque comune. Si arriva alla conclusione che il valore corretto è "Cinisello Balsamo".

La qualità dei dati presenta metodi di valutazione completamente diversi nel Web rispetto a quelli adottati nelle basi di dati, per la grande varietà dei tipi di dati e per la impossibilità, spesso, di confrontare il dato con una conoscenza di riferimento; nel Web la qualità del dato è spesso valutata tramite la veridicità e affidabilità della fonte. Ciò porta a implicazioni cognitive e filosofiche sul concetto di verità in cui ricadono le tematiche delle cosiddette fake news, misinformation, post-verità, su cui non abbiamo qui il modo di soffermarci.

Trattiamo insieme le fasi di trasformazione, arricchimento semantico e integrazione. L'attività di trasformazione è dovuta alla necessità di uniformare le rappresentazioni usate nei diversi tipi di dati, ad esempio una tabella e un documento, per permetterne successivamente un confronto e un collegamento. Supponiamo per esempio di avere informazioni su una patologia descritte in una base di dati epidemiologici e in un insieme di articoli di ricerca; l'attività di arricchimento semantico dei testi degli articoli permette di applicare una tecnica di entity identification che porta all'identificazione nelle tabelle relazionali e nei testi di tutti i valori nelle tabelle e termini nei documenti che fanno riferimento al concetto di patologia, o ad una particolare patologia. Ciò può essere fatto, ad esempio, attraverso la classificazione delle parole presenti nel testo in categorie, quali le patologie, i sintomi, le tipologie di malattia, le medicine, ecc.

Se lo scopo finale è quello, già discusso in precedenza, di collegare il dataset sul Web con un più vasto corpo di conoscenze come il Linked open data cloud (che attualmente contiene oltre 120 miliardi di triple, la struttura tipica dei dati nei linked open data), allora può rivelarsi utile una trasformazione della tabella in una struttura a grafo, così da poter collegare rappresentazioni simili.
C'è un'altra ragione per trasformare i dati strutturati in grafi; le rappresentazioni a grafo possono essere arricchite semanticamente ed espresse per mezzo di grafi nel linguaggio semantico RDF (Resource Description Framework), essendo in grado di utilizzare in tale modo un vasto insieme di funzionalità realizzate e rese disponibili sul Web semantico. Tra i tanti esempi, la explicit semantic analysis associa, ad esempio, una review effettuata da un utente su un luogo di interesse in una mappa in un insieme di features o caratteristiche, che possono essere collegate a una risorsa semantica come Wikipedia; questo permette di creare corrispondenze tra le entità descritte nelle review simili, per creare ad esempio un ranking automatico sulle review, ovvero per collegare le review con altre informazioni che fanno riferimento al punto di interesse, generando una rappresentazione integrata delle diverse informazioni disponibili.
Nello strumento Breezometer, come in molti strumenti che operano su dati territoriali e geografici, c'è la necessità di integrare i diversi dataset discussi in precedenza; ciò può farsi utilizzando le localizzazioni acquisibili con il GPS, ovvero mediante algoritmi che creano corrispondenze tra insiemi selezionati di punti per cui si riescano a determinare le coordinate geografiche di longitudine e latitudine.

Nell'ultimo passo della fase di gestione, l'eliminazione dei dati non rilevanti, affrontiamo un tema tra i più significativi e forse meno studiati dei dati digitali, quello dell'information overload. Nella immagine della sfera in continua espansione di Figura 3 abbiamo commentato il rischio connesso alla nostra incapacità di comprendere realtà complesse, tema che corrisponde alla razionalità limitata studiata da Simon, concetto per cui quando analizziamo un problema, la nostra razionalità è ridotta dalle limitazioni cognitive della nostra mente e dal tempo disponibile per trattare il problema.
Nel fenomeno dell'information overload accade che nell'acquisire nuovi dati su un fenomeno, noi inizialmente accresciamo il valore della conoscenza disponibile; quando, in virtù della nostra razionalità limitata, non riusciamo più a comprendere nella sua complessità ed estensione la conoscenza, nuovi dati ci mandano in confusione, occultando e facendo svanire quanto elaborato in precedenza. Per contrastare il fenomeno dell'information overload dobbiamo procedere all'eliminazione dei dati non rilevanti; ciò può farsi applicando tecniche di filtering, ovvero trasformando i dati producendo di essi versioni più astratte, su questo tema si veda (Batini e Mylopoulos 2018).

LA FASE DI ANALISI

Siamo arrivati alle fasi di visualizzazione e analisi. Nello spazio ristretto dell'articolo, trascuriamo la visualizzazione, e ci concentriamo sull'analisi. Riguardo alla visualizzazione, diciamo solo che essa può essere di tipo esplorativo, per permetterci di osservare i dati a colpo d'occhio, ad esempio alla ricerca di singolarità o outliers, ovvero utilizzata come risultato della analisi, per rendere visivamente le conclusioni cui siamo arrivati. L'inquinamento in una zona del territorio analizzata da Breezometer viene visualizzato attraverso heat map, che possono rappresentare un gradiente

di livelli di inquinamento con diverse intensità di rosso.
Passando all'analisi, la grande novità insita nell'avere disponibili tanti dati sta nel superamento dei vincoli delle analisi statistiche classiche, in cui è troppo costoso o impossibile operare su tutto l'universo sotto osservazione, e ci si limita a analizzare un campione. Ciò richiede l'uso di tecniche di statistica inferenziale, che permettono di valutare la adeguatezza del campione a inferire a partire dalle proprietà del campione corrispondenti proprietà dell'universo.
Oggi in molti fenomeni è possibile analizzare l'intero universo su cui si effettua la analisi. Il progressivo aumento della dimensione dei dataset permette di estrarre (si veda ancora la Figura 2) informazioni aggiuntive rispetto a quelle che si possono ottenere analizzando piccoli dataset e serie temporali; ad esempio, l'analisi per sondare gli "umori" dei mercati e del commercio e per effettuare profilazioni di utenti può essere arricchita analizzando accanto a informazioni di natura anagrafica e professionale, anche informazioni geo referenziate o ottenute attraverso canali social (la cosiddetta sentiment analysis).
Tornando al problema da cui siamo partiti, e cioè trovare la relazione che lega una variabile in output con un insieme di variabili in input, i metodi statistici classici basati su correlazione indagano la forza della relazione tra la variabile in output e le variabili in input e determinano una relazione funzionale attraverso le tecniche di regressione.
La disponibilità dei Big Data, abbiamo visto, porta ad una conoscenza della realtà che può essere caotica e troppo complicata per poter essere compresa; diversi ricercatori hanno saputo sfruttare questa caratteristica dei Big Data. Quando Orien Etzioni si è posto il problema di determinare la legge con cui i prezzi dei voli aerei cambiano nel tempo, per capire qual è il giorno in cui è più conveniente acquistarli, non si è posto l'obiettivo di capire come il prezzo (variabile in output del problema) sia in relazione, ad esempio, con la distanza temporale tra giorno di acquisto e giorno del viaggio, la compagnia aerea, il periodo dell'anno, ecc., in altre parole, il modello di pricing adottato dalle diverse compagnie; era troppo complicato farlo sui 200 miliardi di dati a sua disposizione.
Il machine learning nella sua versione supervisionata, assume che il modello di decisione o di previsione obiettivo della analisi (ad esempio il prezzo di un biglietto aereo in relazione agli elementi che lo influenzano) sia noto per un sottoinsieme di dati detti di training. La relazione è appresa a partire dai dati di training, con diverse tecniche, quali gli alberi di decisione, macchine a vettori, reti bayesiane, e diverse strategie, quali il reinforcement learning, in cui si assume un obiettivo (es., vincere a una partita a scacchi) e si rinforzano le sequenze di scelte che hanno avuto successo, e il deep learning, in cui i dati sono rappresentati a diversi livelli di astrazione, corrispondenti a gerarchie di caratteristiche di fattori o concetti, dove i concetti di alto livello di astrazione sono definiti sulla base di quelli di basso livello.

LE TECNOLOGIE PER BIG DATA

L'informatica ha dato una risposta tecnologica al problema della enorme crescita delle elaborazioni su insiemi di dati sempre più grandi, crescita che, essendo di natura esponenziale, crea un problema di scalabilità nella esecuzione delle ricerche o delle tecniche applicate. Vediamo brevemente alcune tecnologie proposte per Big Data e i principali tipi e modelli di dati.
Nella soluzione basata su Hadoop e Map Reduce, il componente Hadoop permette di gestire per

mezzo di un cluster di processori scalabile e un sistema operativo distribuito un insieme di unità dove i dati sono memorizzati. Ogni blocco di file viene replicato tra più nodi del cluster per garantire tolleranza ai guasti e disponibilità. I dati vengono elaborati per mezzo del software Map Reduce, che organizza l'esecuzione della elaborazione in parallelo su un insieme di processori, e raccoglie i risultati parziali per comporre il risultato in ouput.
Ad esempio, qualora si voglia calcolare il numero di parole di un testo molto grande, possiamo mediante Hadoop acquisire su diversi processori e rappresentare in diverse memorie le parti di testo oggetto di elaborazione, per poi procedere in parallelo mediante Map Reduce al conteggio delle parole nelle singole porzioni, sommando successivamente i risultati parziali.
Nella architettura Spark, contrariamente a Map Reduce che memorizza su disco i risultati parziali o finali delle elaborazioni, i dati sono memorizzati in una memoria centrale condivisa. Ciò rende Spark più efficiente nella esecuzione di algoritmi iterativi, quegli algoritmi che svolgono iterativamente le stesse istruzioni su diversi insiemi di dati.
La rappresentazione dei dati nelle architetture per Big Data evolve rispetto ai sistemi di gestione di basi di dati, ed è basata su modelli:

- key value, che corrispondono a array associativi in cui la struttura del record è formata da una chiave e da un insieme di valori senza schema predeterminato (come, al contrario, accade nelle basi di dati tradizionali);
- document oriented per dati semistrutturati, in cui i valori corrispondono a documenti che possono avere al loro interno una struttura gerarchica;
- Column oriented, che memorizza i dati delle tabelle come sezioni di colonne di dati piuttosto che righe di dati.

LINGUAGGI PER LA ANALISI DEI BIG DATA

Tra i tanti strumenti disponibili per il ciclo di vita dei dati, ci soffermiamo qui sui due linguaggi più utilizzati per le fasi di analisi e visualizzazione, i linguaggi R e Phyton.
R è un ambiente di sviluppo di applicazioni per la analisi e visualizzazione di dati; nasce in ambito statistico come ambiente in cui poter utilizzare la "cassetta degli attrezzi" costituita dalle tecniche statistiche sviluppate nel mondo della ricerca. R è utilizzato soprattutto negli ambiti della formazione e della ricerca; è un software libero in quanto viene distribuito con la licenza GNU GPL, ed è disponibile per diversi sistemi operativi (ad esempio Unix, GNU/Linux, macOS, Microsoft Windows). R è un linguaggio orientato agli oggetti, per il quale una ampia comunità di sviluppatori ha condiviso, ispirandosi alla filosofia del software libero, un vasto insieme di package di analisi e visualizzazione, disponibili nel sito CRAN (https://cran.r-project.org/).
Python è un linguaggio di programmazione completo e utilizza un vasto insieme di strutture di dati; è prevalentemente utilizzato in ambito professionale. La sintassi di Python, insieme al suo carattere di liguaggio intepretato, lo rendono adatto allo sviluppo rapido di applicazioni su un ampio insieme di piattaforme. Anche Python è dotato di una ampia libreria di moduli e strumenti di sviluppo; sia l'interprete Python che la libreria sono disponibili come software libero.

CONCLUSIONI

In conclusione, possiamo definire la Scienza dei dati come l'insieme dei modelli, metodologie, linguaggi, tecniche e tecnologie e delle loro applicazioni, che permettono di ragionare su, elaborare e analizzare un vasto insieme di tipologie di dati digitali, come i dati tabellari, i testi, le immagini, tratti da fonti eterogenee quali il Web, le reti sociali, l'Internet delle cose, essendo in grado di:

- ricostruirne e modellarne il significato attraverso linguaggi semantici,
- applicare tecniche per la valutazione del livello di veridicità e qualità,
- integrare dati eterogenei riconciliandone le differenze,
- interrogare e analizzare i dati mediante linguaggi e ambienti per estrarne conoscenza
- applicare tecniche e modelli statistici e basati su apprendimento per costruire modelli decisionali, interpretativi e predittivi;
- risolvere problemi con il supporto dei dati e prendere decisioni complesse;
- comprendere l'impatto sulla economia e sulla società del fenomeno dei dati digitali.
- analizzare i corpi giuridici sviluppati dalle istituzioni pubbliche in tema di dati digitali
- affrontare i nuovi temi etici che nascono dall'uso dei dati digitali.

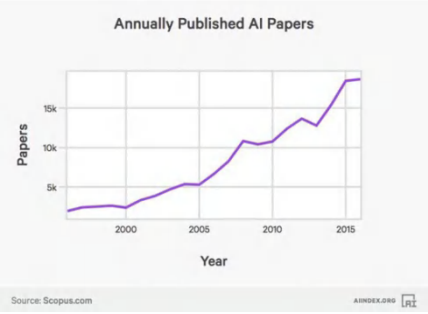
Accanto agli indicatori della literacy e della numeracy, tradizionalmente utilizzati per determinare la capacità di una comunità di comprendere testi, esporre argomentazioni mediante testi scritti o oralmente e far di conto, lo sviluppo impetuoso dei dati digitali e la progressiva maturazione della Scienza dei dati stanno portando alla definizione di un nuovo indicatore, la datacy, che corrisponde alle capacità introdotte nella precedente definizione di Scienza dei dati.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 4

INTELLIGENZA ARTIFICIALE, MACHINE LEARNING E DEEP LEARNING

Intelligenza artificiale

Interesse e fermento crescono sempre più intorno al tema dell'Intelligenza Artificiale (IA), sia da parte delle comunità accademiche e dell'industria, che a livello politico e mediatico. Basta pensare, ad esempio, alla crescita del numero di articoli scientifici pubblicati sul tema dell'IA [5] o dei dati, sia in termini di numerosità che di finanziamento ricevuto, relativi alle startup che sviluppano sistemi basati su IA, o all'andamento temporale della quota di posti di lavoro che richiedono competenze di IA, nonché alla stima della crescita dei ricavi dall'IA per applicazioni aziendali (vedi Figure 1, 2, 3 e 4).



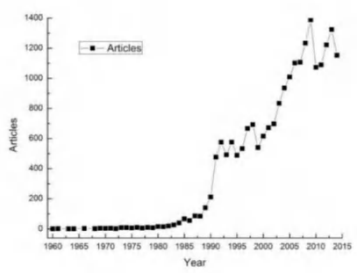
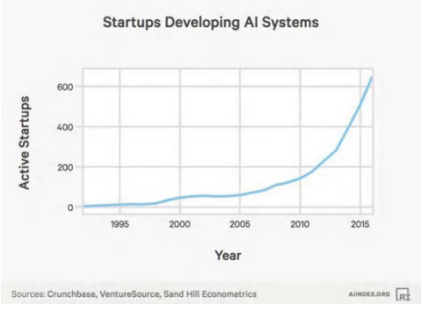


FIGURA 1. NUMERO DI ARTICOLI ACCADEMICI PUBBLICATI ANNUALMENTE SU TEMATICHE DI IA.



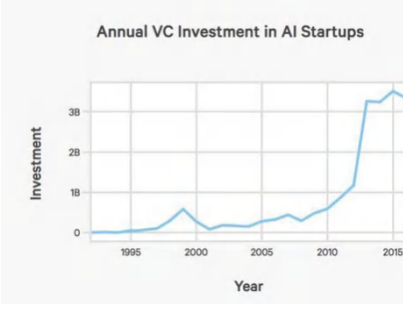


FIGURA 2. STARTUP NEGLI U.S.A. CHE SVILUPPANO SISTEMI BASATI SU IA: NUMEROSITÀ E INVESTIMENTI DI FONDI DI VENTURE CAPITAL.

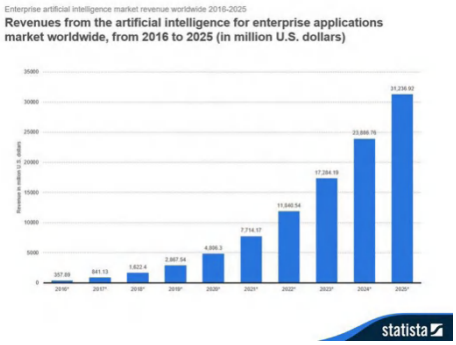


FIGURA 3. PROIEZIONE DI CRESCITA DEI RICAVI MONDIALI DALL'IA PER APPLICAZIONI AZIENDALI.

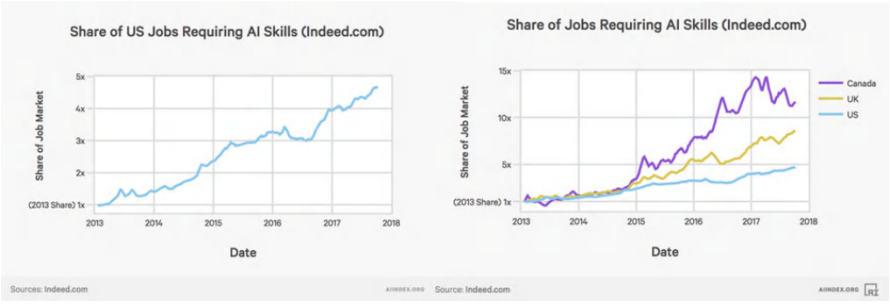


FIGURA 4. EVOLUZIONE DELLA QUOTA DEGLI IMPIEGHI CHE RICHIEDONO COMPETENZE DI IA.

Inoltre, l'IA sta diventando sempre più popolare e le notizie economiche di rilievo ad essa inerenti si susseguono numerose. A titolo di esempio, si possono menzionare le seguenti notizie apparse nell'anno 2018: Apple acquisisce un'azienda di software di IA (21/11), Samsung investe 22 miliardi di dollari in IA e 5G (15/11), Oracle annuncia un'espansione dei propri team di IA in UK (14/11), Microsoft annuncia che il futuro della propria security strategy è l'IA (12/11).

Definizione e storia

Definire l'IA non è facile. Non vi è infatti una definizione universalmente riconosciuta e diversi sono gli approcci utilizzati. Solitamente le definizioni esistenti si riferiscono alla simulazione, mediante elaboratori, dei processi cognitivi degli esseri umani che portano, ad esempio, a risolvere problemi, oppure all'emulazione dei comportamenti e delle attività umane, le quali richiedono intelligenza quando vengono svolte da persone. Con riferimento alla simulazione o emulazione, talune definizioni specificano inoltre anche quale misura di efficacia o di successo vada considerata: la somiglianza con il comportamento umano piuttosto che con un comportamento ideale, detto razionale.

Molteplici furono i contributi che portarono alla nascita di questa disciplina, risalenti addirittura al IV secolo a.C.. Si pensi, ad esempio, al sillogismo aristotelico che si può considerare come pri-

ma macchina astratta per il ragionamento, alla macchina di Pascal (1642), in grado di effettuare operazioni con il riporto automatico, al modello di calcolatore universale di Turing (1936), che introdusse qualche anno più tardi (1950) un criterio per stabilire se una macchina possa essere considerata intelligente, ed al primo lavoro sulle reti neurali di McCulloch e Pitts (1943).

L'anno a cui si fa risalire la nascita ufficiale dell'IA è il 1956 quando, presso il Dartmouth College ad Hanover nel New Hampshire, si svolse un convegno al quale parteciparono molti dei padri fondatori della disciplina: J. McCarthy, A. Newell, H. Simon, M. Minsky, A. Samuel e C.E. Shannon. Il convegno era associato ad una proposta di progetto di ricerca [4] che si basava sulla congettura che "ogni aspetto dell'apprendimento o una qualunque altra caratteristica dell'intelligenza possa, in linea di principio, essere descritta così precisamente che una macchina possa essere costruita per simularlo".

Alle grandi aspettative iniziali seguirono però notevoli difficoltà, in particolare dei progetti GPS (General Problem Solver) e dello sviluppo delle macchine traduttrici, al punto che il governo americano interruppe i finanziamenti (1966). Inoltre, nel 1969, in un articolo coautorato da M. Minsky furono dimostrati i limiti del percettrone, un semplice modello di rete neurale proposto da F. Rosenblatt nel 1958 con uno strato di ingresso, uno di uscita e con una regola di apprendimento, ad esso associata, basata sulla minimizzazione dell'errore, mediante retropropagazione dello stesso (error back-propagation), tra uscita effettiva ad un dato ingresso ed uscita attesa. Il percettrone non era in grado di apprendere qualsiasi funzione; in particolare un percettrone con due input non era in grado di apprendere, poiché non in grado di descriverla, la funzione con la quale si può stabilire se i due input sono diversi.

Negli anni successivi, i ricercatori si focalizzarono su problemi reali ben delimitati, come la pianificazione delle attività di un'azienda, per risolvere i quali la conoscenza specifica del dominio assumeva un ruolo cruciale. Sorsero così i sistemi esperti, ossia sistemi basati su regole logiche e che, su un determinato dominio di conoscenza, mostrano le stesse prestazioni di un esperto umano. Dall'inizio degli anni '80, la ricerca nel settore dell'IA fu quindi ravvivata dal successo commerciale dei sistemi esperti e l'attenzione degli studiosi fu rivolta quindi ai sistemi basati sulla conoscenza e all'ingegneria della conoscenza.

A metà degli anni '80 fu reinventato l'algoritmo di apprendimento back-propagation per reti neurali multilivello le quali, qualche anno dopo, ebbero successo nella risoluzione di problemi di apprendimento in vari ambiti.

A partire dagli anni '90, mentre da un lato venivano ideati nuovi metodi di apprendimento automatico, come le Support Vector Machines, dall'altro si assisteva all'utilizzo sempre più massivo dei processori grafici (GPU, graphics processing unit) che consentivano di disporre di una crescente potenza di calcolo, in grado ad esempio di ridurre notevolmente i tempi di addestramento delle reti neurali.

Dai primi anni del XXI secolo, i vari metodi e modelli di IA, l'accesso all'enorme quantità di dati digitali (big data), nonché la disponibilità di un'enorme potenza di calcolo hanno consentito (e consentiranno sempre di più) la creazione di sistemi intelligenti, capaci cioè di percepire il mondo esterno, apprendere, ragionare ed agire, determinando una diffusione dell'IA senza precedenti in tutti i settori.

È bene sottolineare che i metodi e i modelli di IA non fanno riferimento solamente al Machine Learning e al Deep Learning, sui quali ci si soffermerà maggiormente nel seguito. Nell'ambito dell'IA, un importante filone riguarda l'"Intelligenza collettiva" ed i modelli computazionali reattivi e distribuiti per rappresentare, modellare e simulare comportamenti collettivi complessi e per studiarne le proprietà emergenti. I metodi ed i modelli in questo ambito hanno già permesso di sviluppare sistemi per la rappresentazione, modellazione e simulazione di comportamenti collettivi intelligenti ed auto-organizzanti quali ad esempio le folle. Un altro filone riguarda l'elaborazione simbolica della conoscenza, nel quale l'intelligenza è intesa come capacità di rappresentare e collegare informazioni al fine di inferire nuove conoscenze. Questo ambito fa riferimento ai motori semantici e all'integrazione di grandi quanti quantità di informazioni (Semantic Web, linguaggi per la rappresentazione di basi di conoscenza e Knowledge Graph, ragionamento automatico su basi di conoscenza).

Machine Learning

Il Machine Learning o apprendimento automatico è un'area a metà strada tra l'IA e la Data Science, già discussa sinteticamente in altro contributo. Il Machine Learning si può definire come l'insieme di metodi per realizzare "un processo mediante il quale un sistema migliora la propria performance" (H. Simon) o "un processo di acquisizione di conoscenza in assenza di esplicita programmazione" (L.G. Valiant), o ancora un processo di creazione di un algoritmo o programma che consente di svolgere un lavoro, un compito sulla base di informazioni che non forniscono un'esplicita descrizione di quel programma. Tom M. Mitchell, primo direttore del Dipartimento di Machine Learning presso la Carnegie Mellon University, ha fornito nel suo libro [4] la definizione più citata di apprendimento automatico: "un programma apprende con riferimento ad un particolare compito T, misurazione della performance P ed esperienza E, se esso migliora la propria performance P nell'eseguire il compito T, mediante l'esperienza E". Un notevole interesse è rivolto a programmi ad esempio in grado di imparare a riconoscere il viso delle persone, un animale, un oggetto, le parole scritte a mano, o raccomandare un tipo di musica o un film, o guidare veicoli a guida autonoma. Quindi, con riferimento ad un programma che riconosce le parole scritte a mano, T è il compito di riconoscere tali parole, P è la percentuale di parole correttamente classificate ed E è un insieme di immagini di parole scritte a mano accompagnate da etichette che specificano a quali parole esse corrispondono.

Vi sono (almeno) tre tipologie di apprendimento.

- Apprendimento supervisionato: all'algoritmo di apprendimento sono forniti, come esperienza, dati di input e rispettivi output ed esso intende calcolare (compito) la funzione, la regola cha associa a ciascun input il corrispondente output. Tipicamente, come esempi di algoritmi di apprendimento supervisionato vi sono quelli che si basano sulle Reti Neurali, nonché quelli utilizzati per risolvere problemi di classificazione. Una volta che l'algoritmo ha appreso la funzione a partire dai dati (training set), segue una fase di test per valutare la sua capacità di generalizzazione ossia di fornire output corretti su input non contenuti nel training set.
- Apprendimento non supervisionato: all'algoritmo di apprendimento sono forniti, come espe-

rienza, dati di input senza che questi siano associati a valori di output, ossia non etichettati, ed esso ha il compito di riconoscere schemi/strutture nell'insieme dei dati forniti. Rientrano nella classe degli algoritmi di apprendimento non supervisionato, quelli di clustering, ossia quegli algoritmi che hanno il compito di raggruppare i dati sulla base di strutture, schemi o affinità che essi devono riconoscere.

- Apprendimento per rinforzo: l'algoritmo di apprendimento apprende sulla base della risposta dell'ambiente alle sue azioni; in tal caso, infatti, vi è un'interazione con un ambiente nel quale esso deve svolgere un compito e dal quale ottiene una risposta in termini di "ricompensa" (il rinforzo) che consiste nella valutazione della prestazione. Come esempi, citiamo gli algoritmi che imparano a giocare ad un gioco giocando contro un avversario e quelli che consentono ad un robot di muoversi all'interno di un ambiente (il sistema deve essere in grado di percepire ed agire).

Deep Learning

Il Deep Learning, o apprendimento profondo, è l'ambito di ricerca del Machine Learning e quindi dell'IA, che si riferisce a quei metodi di apprendimento che fanno uso di reti con molti livelli intermedi, corrispondenti a diversi livelli di rappresentazione e astrazione dei dati che essi elaborano. I livelli infatti sono disegnati per svolgere, ciascuno, compiti specifici, segnatamente di estrazione di talune caratteristiche dai dati ricevuti. Generalmente, ogni livello utilizza in ingresso le uscite del livello precedente. Gli algoritmi intendono quindi apprendere multipli livelli di rappresentazioni, i quali formano una gerarchia di caratteristiche. Gli algoritmi possono essere sia di tipo supervisionato che non. Tra le suddette reti, vi sono senza dubbio le Reti Neurali profonde.

Basandosi su reti profonde, definite quindi da molti più parametri rispetto alla loro controparte poco profonda, gli algoritmi di Deep Learning sono in grado di apprendere situazioni e/o realtà molto complesse e con performance elevatissime. È importante sottolineare che questo tipo di apprendimento è reso possibile da un lato da una disponibilità ormai diffusa di potenti risorse di calcolo (in particolare delle GPU che ben si prestano all'elaborazione su strutture matematiche come le reti ed i vettori e che hanno consentito di aumentare la velocità dell'apprendimento di uno o anche più ordini di grandezza) e dall'altro dall'accesso a grandi quantità di dati digitali (big data, vedi il contributo specificamente dedicato a questo tema); essi sono indispensabili, ad esempio, per l'individuazione, nei casi supervisionati, di un training set sufficientemente numeroso per assicurare elevate performance da parte di siffatti algoritmi che devono apprendere un numero considerevole di parametri.

Impatto e applicazioni

Secondo uno studio di Gartner [2], a livello globale il giro d'affari delle soluzioni aziendali costruite su piattaforme di IA crescerà a ritmi vertiginosi. Nell'anno 2018 verrà generato a livello globale un giro d'affari da 1.200 miliardi di dollari, con un incremento del 70% sul dato del 2017, mentre nel 2022 il business dovrebbe valere 3.900 miliardi. Sono tre gli ambiti applicativi che sosterranno questa espansione: quello della customer experience, quello della creazione di nuovi ricavi, con lo sviluppo di nuovi prodotti e servizi, e quello della riduzione dei costi nella produzione o nel

delivery. "L'IA sarà una delle tecnologie più disruptive dei prossimi dieci anni", spiega il vice presidente di Gartner, "sia per i continui progressi in termini di potenza computazionale per la gestione dei volumi, della varietà e della velocità dei dati, che per l'affermazione delle Reti Neurali profonde".

In un interessante rapporto di Forrester [1], vengono esaminati 13 tra le più importanti tecnologie di IA. Gli autori le classificano in base a come esse siano in grado di imitare le capacità degli umani di percepire, pensare, agire e svolgere tutte e tre le funzioni:

- image and video analysis, Biometrics, Speech recognition, Text analytics and Natural Language Processing (NLP) (percepire);
- Machine Learning platforms, Deep Learning platforms, Semantic Technology, AI-optimized hardware, Swarm intelligence (pensare);
- Natural language generation, Decision management (agire);
- Robotic process automation, Virtual agents (percepire, pensare e agire).

Il rapporto esamina inoltre gli stati attuali e futuri delle 13 tecnologie più importanti, anche in termini di valore aggiunto, facendo riferimento a cinque fasi: creazione, sopravvivenza (nel mercato), crescita, equilibrio e declino (vedi Figura 5).

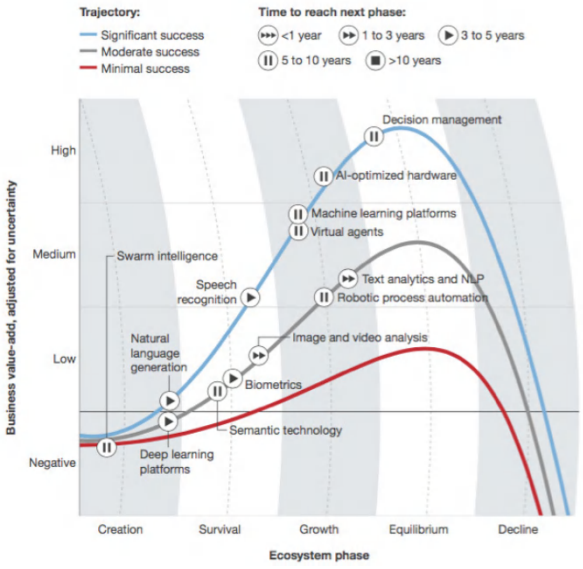


FIGURA 5. LE CINQUE FASI E IL VALORE AGGIUNTO DELLE 13 PIÙ IMPORTANTI TECNOLOGIE DI IA.

Conclusioni

L'IA ha un ruolo strategico ed un impatto dirompente sulla nostra società; consente lo sviluppo di sistemi informatici in grado di svolgere compiti che normalmente richiedono l'intelligenza umana, come la percezione visiva, il riconoscimento vocale, i processi decisionali e la traduzione tra le

lingue. Nella recente dichiarazione europea "AI for Europe", essa viene paragonata per forza strategica all'elettricità del XIX secolo.

L'IA può essere un potente strumento per aumentare le capacità umane (augmented intelligence) e per creare sistemi e robot autonomi e collaborativi; è quindi importante capirne le potenzialità ma anche le implicazioni etiche e sociali. Le eccezionali nuove opportunità create dall'IA si presentano infatti insieme a vulnerabilità e rischi: la società e gli individui possono essere esposti a discriminazioni automatiche, violazione della privacy, perdita di autonomia e mancanza di trasparenza; tali rischi possono minare la fiducia degli stakeholder e l'accettazione delle nuove opportunità da parte della società.

Per creare le basi affinché anche in Italia si sviluppi un efficace ecosistema dell'IA, è stato da poco fondato il Laboratorio Nazionale AIIS "Artificial Intelligence and Intelligent Systems" del CINI (Consorzio Interuniversitario Nazionale per l'Informatica) che consentirà di approfondire e coordinare il lavoro di tutte le aree di IA. Si intende costruire un sistema inclusivo di tutte le competenze e votato ad evidenziare le eccellenze nazionali per rafforzare il ruolo scientifico e tecnologico dell'Italia in Europa e nel Mondo.

RIFERIMENTI

[1] Forrester™, "TeachRadar: Artifical Intelligence Techologies, Q1 2017.

[2] Gartner, "Forecast: The Business Value of Artificial Intelligence, Worldwide, 2017-2025", 2018.

[3] J. McCarthy, M.L. Minsky, N. Rochester, C.E. Shannon, "A Proposal for the Darthmouth Summer Research Project on Artificial Itelligence", 19.

[4] T.M. Mitchell, "Machine learning" McGraw Hill, 1997.

[5] Standford University, "Artificial Intelligence Index - 2017 Annual Report, 2017.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 5

TECNOLOGIE IMMERSIVE: REALTÀ VIRTUALE E REALTÀ AUMENTATA

Realtà virtuale

La realtà virtuale, per sua stessa definizione, simula la realtà effettiva. L'avanzamento delle tecnologie informatiche permette di navigare in ambientazioni fotorealistiche in tempo reale, interagendo con gli oggetti presenti in esse.

Anche se, a livello teorico, la realtà virtuale potrebbe essere costituita attraverso un sistema totalmente immersivo in cui tutti i sensi umani possono essere utilizzati (più specificamente realtà virtuale immersiva o RVI), attualmente il termine è applicato solitamente a qualsiasi tipo di simulazione virtuale creata attraverso l'uso del computer, dai videogiochi che vengono visualizzati su un normale schermo, alle applicazioni che richiedono l'uso degli appositi guanti muniti di sensori (wired gloves) e infine al World Wide Web.

La realtà virtuale immersiva (un ambiente costruito intorno all'utente) secondo il livello tecnologico attuale e secondo le previsioni possibili per il prossimo futuro potrà essere utilizzata diffusamente grazie ad alcune periferiche (in parte già utilizzate):

- visore - un casco o dei semplici occhiali in cui gli schermi vicini agli occhi annullano il mondo reale dalla visuale dell'utente. Il visore può inoltre contenere dei sistemi per la rilevazione dei movimenti, in modo che girando la testa da un lato, ad esempio, si ottenga la stessa azione anche nell'ambiente virtuale.
- auricolari - trasferiscono i suoni all'utente.
- wired gloves - i guanti rimpiazzano mouse, tastiera, joystick, trackball e gli altri sistemi manuali di input. Possono essere utilizzati per i movimenti, per impartire comandi, digitare su tastiere virtuali, ecc.
- cybertuta - una tuta che avvolge il corpo. Può avere molteplici utilizzi: può simulare il tatto flettendo su se stessa grazie al tessuto elastico, può realizzare una scansione tridimensionale del corpo dell'utente e trasferirla nell'ambiente virtuale.

La differenza con una realtà virtuale non immersiva consiste nel fatto che in quest'ultimo caso non si fa uso di caschi, ma l'utente si troverà semplicemente dinanzi ad un monitor, il quale fungerà da finestra sul mondo tridimensionale con cui l'utente potrà interagire attraverso joystick appositi. È chiaro che l'effetto che ne deriva è assolutamente diverso da quello che si ottiene con una realtà virtuale immersiva, in cui gli effetti che l'utente percepisce sono molto più coinvolgenti e capaci di distrarre del tutto dalla realtà.

Alcuni ipotizzano che queste periferiche potranno un giorno essere sostituite da sistemi collegati direttamente al cervello dell'utente (cosiddetto wetware).

Uno dei linguaggi più diffusi per la creazione di mondi virtuali è il VRML (Virtual Reality Modeling Language), capace di rappresentazioni 3D interattive e fruibili anche attraverso il web. Fra le sue caratteristiche principali si ricordano la possibilità di definire vertici e spigoli di poligoni tridimensionali, le informazioni sul colore, l'opacità e la brillantezza delle superfici, le fonti luminose, e altro ancora. È anche possibile l'associazione di URL agli oggetti per consentire la navigazione verso pagine HTML o altre pagine VRML. Molto utile è la possibilità di gestire animazioni e suoni attraverso procedure attivabili da eventi esterni.

Il futuro della Realtà virtuale

A cosa serve tutto quanto abbiamo visto? È una domanda che non ha una risposta unica. La risposta più semplice ma meno soddisfacente è che è per tutti i campi. Oltre ai giochi e altri tipi di intrattenimento interattivo, la realtà virtuale mostra applicazioni promettenti per il sollievo dal dolore, per l'istruzione, il design, sia per il telelavoro che per il lavoro d'ufficio. Le esperienze che abbiamo virtualmente, dalle nostre reazioni all'ambiente circostante alla qualità delle nostre interazioni, sono memorizzate e recuperate nel nostro cervello.

Eppure, per tutti i miliardi di dollari versati campo, nulla è ancora emerso come l'iPhone della VR: ossia il prodotto che combina una tecnologia avvincente con una forma intuitiva e desiderabile. E mentre la realtà aumentata è ancora indietro di alcuni anni rispetto alla realtà virtuale, è ovvio che queste tecnologie non rimarranno distinte per molto tempo, ma si fonderanno in un unico dispositivo.

REALTÀ AUMENTATA (AR)

Definizione

La realtà aumentata permette di creare un ambiente virtuale che inviluppa l'utente e che simula una full immersion nell'ambiente selezionato.

Gli elementi che «aumentano» la realtà possono essere aggiunti attraverso un dispositivo mobile, come uno smartphone, un PC dotato di webcam o altri sensori, con dispositivi di visione (per es. occhiali a proiezione sulla retina), di ascolto (auricolari) e di manipolazione (guanti) che aggiungono informazioni multimediali alla realtà già normalmente percepita.

Le informazioni «aggiuntive» possono in realtà consistere anche in una diminuzione della quantità di informazioni normalmente percepibili per via sensoriale, sempre al fine di presentare una situazione più chiara o più utile.

APPLICAZIONI DI AR

Riduzione dei costi di produzione nelle attività creative

La "prototipazione virtuale" ci consente di abbreviare tempi e costi di iterazione nello sviluppo del prodotto, migliorando allo stesso tempo la qualità del prodotto finale. Ad esempio, una società di progettazione ha superato i risparmi di $ 50.000 per un cliente nel settore aeronautico utilizzando la prototipazione della realtà virtuale per abolire due cicli di prototipi fisici ed eliminare il tempo che sarebbe stato necessario per l'assemblaggio di campioni personalizzati. Un uso più ampio della prototipazione virtuale consentirà alle aziende di ridurre il numero di costosi prototipi

necessari e di ridurre significativamente la tempistica dalla progettazione concettuale alla produzione e alla commercializzazione.
"Puoi ripetere il piano della tua città, la tua casa e il cantiere di costruzione molte più volte prima di iniziare a scavare o fare cambiamenti. Di conseguenza, otterremo creazioni migliori", afferma Jeffrey Powers, co-fondatore e CEO di Occipital.
Mentre le tecnologie tradizionali consentono alle aziende di prototipare con tecnologia immersiva, ai progettisti viene offerta un'esperienza più diretta grazie alla possibilità di camminare, volare e interagire con i loro prototipi, sia in ambiente AR che VR. L'implicazione è che le tecnologie immersive promettono una maggiore accuratezza nella progettazione e, di conseguenza, un prodotto finale di qualità superiore a un costo potenzialmente più economico di quello che le tecnologie di prototipazione tradizionali possono fornire.

LA REALTÀ AUMENTATA NELL'INDUSTRIA 4.0

Un capitolo a parte merita il legame tra realtà aumentata e Industria 4.0: è evidente che in una classica attività industriale esistono tutta una serie di operazioni che sono costantemente a rischio di essere inficiate dal classico errore umano o comunque, di essere eseguite nella maniera non ottimale, creando inefficienze e costi di varia natura. La possibilità che l'AR offre di visualizzare il corretto andamento delle operazioni, passo dopo passo, è in grado di garantire un sensibile apporto al miglioramento delle attività di produzione. Da evidenziare che, a ulteriore vantaggio degli operatori, si stanno facendo largo i dispositivi Head Mounted, che permettono di operare lasciando le mani libere e spostando la parte di visione direttamente sulla testa. Ovviamente, ci possono essere numerosi vantaggi dal punto di vista della manutenzione e assistenza, nonché del controllo qualità. A monte della produzione industriale, inoltre, la realtà aumentata può essere di ausilio per il design e la progettazione di prodotti e soluzioni. Le tecnologie AR e VR consentono di visionare il prodotto nelle fasi di design, in scala reale e con interazioni naturali, prima che venga realizzato anche solo un prototipo fisico. Questo consente di ottimizzare le fasi di progettazione, anticipare le problematiche relative all'oggetto (ergonomia, interferenze, accessibilità) e ridurre così l'impatto sui costi di sviluppo del prodotto.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 6
ECOSISTEMI DIGITALI

Nel corso degli ultimi mesi, l'espressione "ecosistemi digitali" è divenuta una nuova buzzword ripetuta in modo quasi ossessivo. Indubbiamente, al di là delle mode, questa espressione rimanda ad una serie di dinamiche che stanno profondamente cambiando l'economia e la società: Qualunque iniziativa o attività non è più condotta da singole imprese o individui, ma si sviluppa attraverso l'interazione e la cooperazione di una molteplicità di soggetti. Non esiste più il monopolista classico o l'operatore verticalmente integrato in grado di controllare e gestire in modo autonomo un settore del mercato. Anche i colossi dell'economia moderna dipendono da altri attori e devono con essi coordinarsi o comunque relazionarsi. Non per nulla, costruiscono loro ecosistemi per interagire con partner, fornitori e clienti. Si pensi alla rete di relazioni create da giganti come Amazon, Google o Apple. In generale, non si tratta di un cambiamento semplicemente riconducibile ad un puro sviluppo tecnologico o ad un diverso business model, quanto di un profondo mutamento della struttura e delle dinamiche stesse dei mercati e dei contesti sociali nei quali i diversi soggetti operano. Il tema è particolarmente importante per le amministrazioni pubbliche:

1. Sono un elemento essenziale di competitività e sviluppo sociale ed economico.
2. Costituiscono esse stesse una molteplicità di attori che devono collaborare tra loro.
3. Devono interagire e collaborare con la società, i cittadini e le imprese.

Per tutti questi motivi, è quindi essenziale da un lato eliminare dal dibattito ogni fonte di confusione o di vuota retorica e, dall'altro, comprendere al meglio come progettare, sviluppare e gestire ecosistemi in grado realmente di dispiegare e realizzare tutti i vantaggi e le promesse di cui tanto si discute.

Cosa è realmente un ecosistema

Un ecosistema è un insieme di attori che collaborano sulla base del principio della coopetition:

- Si collabora nella definizione di un insieme di regole e infrastrutture comuni e condivisi, il cosiddetto level playing field.
- Si compete (o comunque si opera in modo indipendente) nella realizzazione e offerta di servizi ai propri clienti (qualunque sia la loro natura e struttura).

Un ecosistema è digitale quando si articola, struttura e opera attraverso e grazie a infrastrutture e servizi digitali. Ovviamente, qualunque ecosistema oggi tende ad essere digitale, vista la natura pervasiva e abilitante di tali tecnologie e servizi.
Un concetto chiave nell'ambito di un ecosistema digitale è quello di API (Application Programming Interface). Una API definisce la modalità secondo la quale un sistema informatico è in grado in

interagire e cooperare con altri sistemi informatici (un "bocchettone di accesso al sistema"). La costruzione di API deve basarsi da un lato su standard tecnologici e applicativi e, dall'altro, su modelli di business e di interazione (come discusso in seguito).
Un ecosistema può svilupparsi a diversi livelli o contesti:

1. Aperto (internet): chiunque può far parte dell'ecosistema purché ne accetti le regole condivise. È il caso di E015 sviluppato in occasione di Expo 2015.
2. Controllato (extranet): l'accesso all'ecosistema è garantito ad una molteplicità di attori, ma avviene all'interno di un contesto controllato. Per esempio, è il caso di filiere di fornitura o di partnership come Cargo City Malpensa (ecosistema sviluppato da Regione Lombardia e dall'operatore aeroportuale milanese per interagire con i diversi attori della filiera).
3. Chiuso (intranet): l'accesso all'ecosistema è limitato alle strutture e divisioni di una singola azienda. È il caso di molte imprese che stanno sviluppando i propri sistemi informativi valorizzando il concetto di ecosistema per abilitare la cooperazione e le sinergie tra le diverse componenti e strutture aziendali.

Cosa non è un ecosistema

Molto spesso, si utilizza il termine ecosistema in modo parziale o distorto o proprio erroneo. Vediamo alcuni casi tipici:

a. Un developer portal non è un ecosistema, ma solo un servizio tecnologico di supporto alla creazione di un ecosistema. Mancano infatti molti elementi chiave di un ecosistema, a cominciare dalle regole condivise e dai criteri di qualità, e dai relativi processi di monitoraggio e enforcement.
b. Un portale unico di servizi non è un ecosistema. Anzi, per molti versi ne costituisce l'antitesi in quanto nasconde o cancella tutte le dinamiche di interazione, apertura, cooperazione e competizione tipiche di un ecosistema.
c. Un applicativo dotato di API non è un ecosistema, ma solo un sistema informatico che è in grado di interagire con altri servizi e prodotti.
d. Un insieme pubblico di standard non è di per sè stesso un ecosistema, in quanto mancano gli elementi infrastrutturali abilitanti e di governance presenti in un ecosistema.

Per questo è vitale caratterizzare e definire con precisione cosa realmente sia un ecosistema e come lo si possa costruire affinché offra tutti i vantaggi e benefici attesi.

Elementi per la costruzione di un ecosistema

La costruzione di un ecosistema è un processo complesso che richiede l'interazione virtuosa di una molteplicità di attori in diversi ambiti e contesti:

1. Strategie, "pivot" e driver.
2. Definizione di standard, processi, modelli di governance, infrastrutture abilitanti.
3. Modelli di business e di collaborazione pubblico-privato.

Vediamoli nel dettaglio.

Strategie, pivot e driver

Un ecosistema si costruisce sulla base di una strategia, cioè la combinazione di obiettivi condivisi, guiding policies e roadmap di attuazione. Per esempio, l'idea di E015 era quella di rendere il territorio più "intelligente" facendo in modo che una molteplicità di attori potessero sviluppare in parallelo applicazioni in grado di integrare fonti e flussi informativi complementari.
La strategia deve far perno su un pivot - per E015 la società Expo 2015 - che costituisce da un lato il "committente ultimo" e, dall'altro, l'elemento di convergenza e di allineamento tra i diversi interessi degli attori coinvolti.
Un terzo elemento chiave sono i driver che garantiscono la motivazione e la convergenza dei diversi attori coinvolti. Nel caso di E015, i driver erano di due tipi: marketing (il poter essere parte dell'ecosistema di Expo 2015) ed economico-strategici (ciascun attore riesce in modo più semplice ed economico a promuovere propri servizi e prodotti o a realizzarne di nuovi altrimenti non fattibili).
Ecco quindi che un ecosistema si basa innanzitutto su questi tre elementi chiave:

- Strategia
- Pivot
- Driver

Chiunque voglia realizzare un ecosistema deve innanzitutto partire dalla definizione di questi tre elementi.

Standard, governance, processi, infrastrutture

Dal punto di vista operativo, un ecosistema necessita di una serie di elementi e componenti chiave:

1. Standard tecnologici e applicativi condivisi (per esempio, glossari dati).
2. Modelli di governance e regole che definiscano come i diversi attori dell'ecosistema operano e si coordinano (per esempio, per pubblicare una API).
3. Processi operativi di supervisione ed enforcement delle regole e dei processi condivisi.
4. Infrastrutture di supporto (come developer portal, ambienti social di collaborazione, infrastrutture di monitoraggio e controllo operativo).

Tali elementi devono essere gestiti da idonee strutture organizzative di ecosistema. Nel caso di E015, esse erano da un lato la società Expo 2015 (e ora Regione Lombardia) e, dall'altro, l'EMB (Ecosystem Management Board) che ha il compito di attuare e monitorare i processi di governance dell'ecosistema.

Modelli di business e di collaborazione pubblico-privato

Gli attori di un ecosistema devono avere un interesse a partecipare all'ecosistema stesso. Tale interesse può essere economico o istituzionale o sociale. Ma in ogni caso, nel pensare ad un ecosistema è necessario identificare i modelli di business o (in generale) di collaborazione che devono/possono essere adottati dai diversi partecipanti.

Inoltre, negli ecosistemi aperti e controllati promossi o partecipati in qualunque forma da amministrazioni pubbliche, deve essere chiaro il modello di collaborazione pubblico-privato.

1. Le amministrazioni pubbliche razionalizzano e consolidano le proprie basi di dati strategiche e ne rendono possibile l'accesso via API (alcune a livello extranet delle amministrazioni e altre a livello internet).
2. Le amministrazioni pubbliche si concentrano sullo sviluppo dei servizi di backend relativi ai propri sistemi informativi e alle basi di dati strategiche, e alla razionalizzazione/reengineering dei processi di interazione intra-amministrazioni.
3. I privati sviluppano in competizione tra loro servizi di frontend secondo loro modelli di business.
4. Le amministrazioni pubbliche sviluppano solo servizi di frontend essenziali/core.

Si tratta di un esempio, ma costituisce comunque un template o un caso di riferimento che si può utilizzare per costruire altre policy o modelli di collaborazione.

Un supporto continuo e sistematico

Quanto discusso in precedenza costituisce il core delle attività necessarie ad avviare un ecosistema. Tali azioni devono essere accompagnate da altre iniziative che abbiano lo scopo di sostenere nel tempo (e anzi accelerare) i processi di crescita e sviluppo di un ecosistema. In particolare, è utile ricordare almeno due aree di intervento importanti:

1. Sviluppo di una strategia di comunicazione per far conoscere le caratteristiche, i vantaggi, le funzionalità di un ecosistema.
2. Messa a disposizione di componenti riusabili open source, best practices, servizi di consulenza e supporto, che possano semplificare il lavoro di coloro che devono mettere in piedi e/o contribuire allo sviluppo di un ecosistema.

CONCLUSIONI

Queste note non hanno l'ambizione di esaurire in poche righe concetti e problemi complessi e articolati. Esse ambiscono a indicare e introdurre alcune tematiche vitali per lo sviluppo del Paese. Sta a tutti noi, cittadini, imprese e amministrazioni lavorare affinché gli spunti e le opportunità che ci sono offerte dallo sviluppo delle tecnologie e dei mercati possano realmente tradursi in sviluppo e, in generale, in occasioni di miglioramento e crescita della nostra società. In particolare, dobbiamo fare in modo che un concetto di importanza vitale come quello di ecosistema (digitale) non si annacqui o svilisca nel solito circuito mediatico fatto di retorica, dichiarazioni di principio o mere proposizioni commerciali. È essenziale che si dia corpo e sostanza al concetto di ecosistema digitale, attraverso una solida roadmap che trasformi le idee in realizzazioni e le promesse in vantaggi concreti per cittadini e imprese.

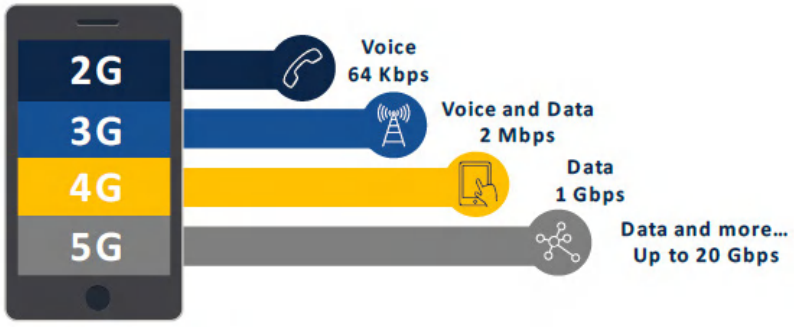
TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 7

RETI E SERVIZI RADIO MOBILI

Evoluzioni da LTE a 5G

Le reti 4G (LTE) hanno rappresentato il caso di maggior successo in termini di velocità di adozione delle reti mobili dalla nascita del sistema digitale GSM. LTE è ancora in fase di evoluzione negli enti di standardizzazione per permettere velocità di connessioni sempre più veloci e nuovi servizi. Il 3GPP ha già definito le evoluzioni LTE-A (Advanced) già comparso sul mercato e LTE Pro prossimo alla implementazione da parte delle società manifatturiere di terminali e nodi di rete per raggiungere velocità di picco dell'ordine del 1Gbps.

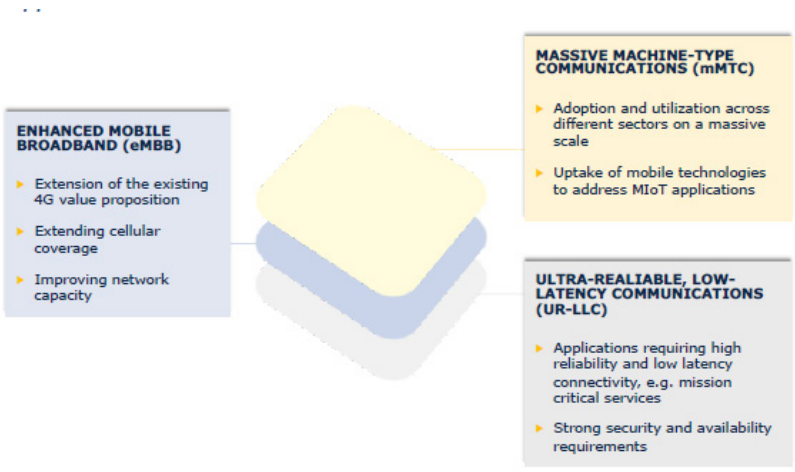
Il 4G come tutte le generazioni che l'hanno preceduta, è stato concepito per un uso human centric - rispetto al 3G fornisce una superiore qualità di banda che abilita l'accesso in mobilità dei servizi internet ("Mobile Internet") più evoluti come i servizi video da dispositivi mobili (PC; tablet e smartphone). Sono nate quindi delle varianti dello standard – come il NB LTE o LTE M2M – pensato per dare connettività anche ad oggetti in particolare a basso bit rate e basso consumo energetico come i sensori.



Source: DotEcon and Axon

Il 5G per contro nasce nativamente machine centric per fornire connettività nell'ambito industriale e supportare la Digital Transformation di interi settori denominati "verticals". Il 5G è quindi il nuovo paradigma per le reti di telecomunicazioni il cui obiettivo è quello di estendere la connettività a dispositivi che possono comunicare tra loro ("machine to machine" o "M2M") sfruttando la mobilità come elemento essenziale per accedere a qualsiasi tipo di servizio. Allo scopo di abilitare la connettività ad un ampio numero di applicazioni e use cases, l'accesso wireless per il 5G deve estendere le sue funzionalità per andare molto oltre a quanto la precedente generazione ha permesso di ottenere.

Esempi di tali funzionalità sono servizi ad altissima capacità e rate trasmissivo, molto spesso richiedenti ultra-reliability e bassa latenza in contesti per lo più caratterizzati da un enorme quantità di dispositivi . In particolare i tre principali use cases su cui si è raggiunto un' accordo condiviso per 5G sono: Enhanced Mobile Broadband (eMBB), comunicazioni a bassa latenza ultra-affidabili (URLLC) e comunicazioni massive di tipo macchina (mMTC).



Source: DotEcon and Axon

Enhanced Mobile Broadband - eMBB

eMBB si riferisce al supporto esteso degli MBB convenzionali grazie a requisiti di rate, capacità e copertura dati di gran lunga superiori rispetto a quanto fornito dalla generazione precedente. Può considerarsi come un'evoluzione del 4G in termini di banda per supportare servizi avanzati video in 4K e 8K e per nuovi paradigmi multimediali come l'Augmented Reality (AR) e la Virtual Reality (VR) già anticipati durante le Olimpiadi Invernali in Corea nel 2017.
L'eMBB sarà la prima versione del 5G presente sul mercato grazie ad una anticipazione dello standard (Rel 15 "early drop") caratterizzato da una nuova interfaccia radio – 5G New Radio" (NR) – che verrà aggiunta alle stazioni 4G già presenti sul territorio in modalità non stand alone ("5G NSA"). In Italia è in fase di test da parte dei maggiori operatori del settore sia a livello di lab che sul campo nell'ambito del Piano 5G MISE nelle città di Bari, Matera, Prato, L'Aquila e Milano.

Ultrareliable Low Latency Communications - UrLLC

URLLC è un requisito di bassissima latenza ed altissima affidabilità per le applicazioni mission critical come l'internet industriale, chirurgia a distanza e sistemi di trasporto intelligenti (ITS) in particolare a guida autonoma. Permette di raggiungere bassissime latenze (sotto i 10ms) grazie a meccanismi di priorizzazione dei pacchetti sull'interfaccia radio e in rete che richiedono nuove funzionalità avanzate a livello di core network oltre che nell'interfaccia radio descritti in seguito. Tali funzionalità "5G New Core" (5G NC) verranno rilasciate nelle versioni successive dello stan-

dard e saranno pronte per il 2020. Use cases come la sorveglianza della rete elettrica, il controllo remoto per la sicurezza e Smart Manufacturing, richiedono sia una bassa latenza che un'elevata affidabilità al di sopra del livello HARQ corrente. Affinché LTE soddisfi questi requisiti 5G, c'è un obiettivo per due miglioramenti da fare per Rel-15: reliable and short TTI e operatività con un adeguato livello di affidabilità ad 1ms.
Agendo su un TTI breve (short TTI) e sulle caratteristiche UL veloci, il tasso di errore del pacchetto può essere ridotto a un livello 10-5 attraverso una combinazione di codifica di messaggi di controllo dati robusta, con diversità e ripetizioni automatiche senza feedback. Poiché l'elaborazione viene mantenuta in tempi brevi, l'intera catena di trasmissione può essere consegnata entro 1 mese con l'affidabilità combinata di più prove. In questo caso l'obiettivo è di operare su piccole celle, come fabbriche e uffici.
Inoltre, il caso di copertura di aree estese con latenza rilassata, ma richiedenti affidabilità estrema, può essere gestito mediante ripetizioni automatiche di trasmissioni da 1ms codificate in modo robusto con feedback potenziato.

Massive Machine Type Communications - mMTC

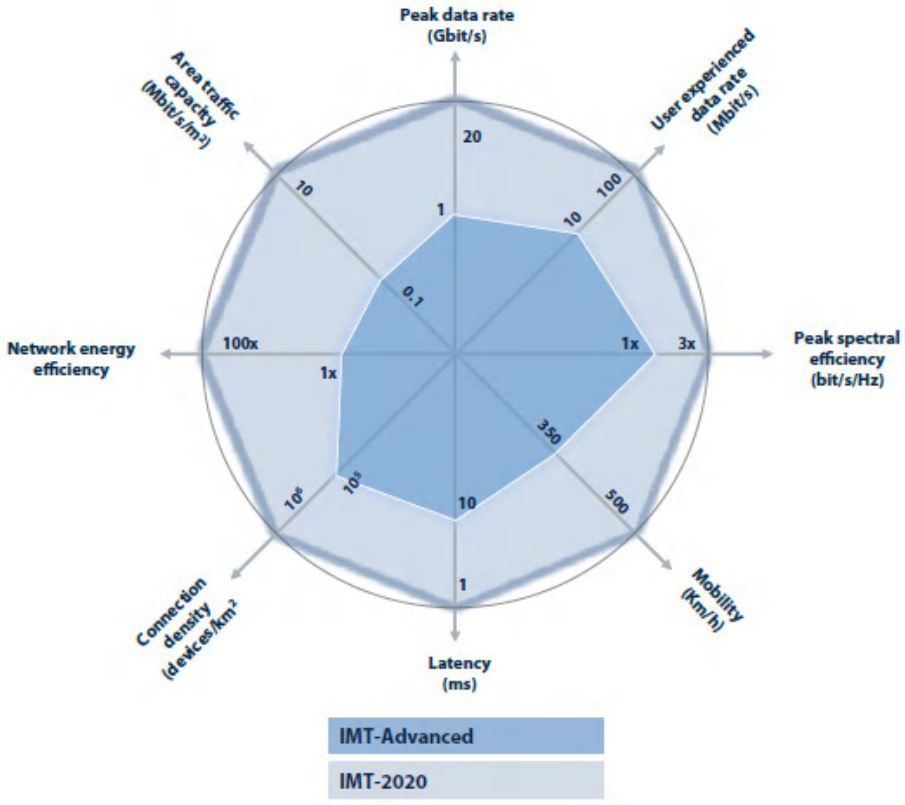
Ultimo, ma certamente non meno importante è l' mMTC che è necessario per supportare lo scenario 5G IoT previsto con decine di miliardi di dispositivi e sensori collegati (sino a 1milione di dispositivi per km^2). Anche questa modalità richiede nuove funzionalità a livello core della rete e pertanto verrà rilasciate con le nuovi versioni dello standard. Abiliterà servizi di sensoristica distribuita in ambito industriale ed agricolo pertanto verranno anticipate da soluzioni basate su varianti dello standard 4G qui di seguito descritte.

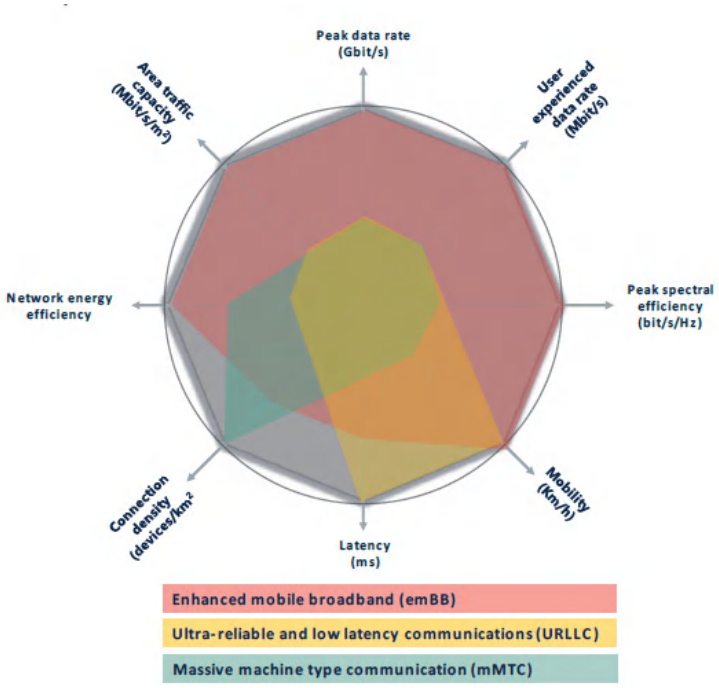
Le comunicazioni di tipo Massive machine LTE MTC e NB-IoT sono state sviluppate per risolvere gli use cases di mMTC [3]. Offrono miglioramenti simili per quanto riguarda la copertura, la durata della batteria, l'efficienza di segnalazione e la scalabilità, ma rispondono a requisiti leggermente diversi in termini di flessibilità e prestazioni. Sostanzialmente LTE MTC è in grado di sostenere velocità di trasmissione dati più elevate e mobilità in modalità connessa sia intra-Radio Access Transmission (RAT) che inter-RAT. Con il nuovo LTE MTC Categoria M1 (Cat-M1) e NB-IoT, che sono stati specificati in Rel-13 3GPP, si prevede che il costo del modem possa essere drasticamente ridotto rispetto ai dispositivi Rel-8 Cat-1. Il costo varierà in base a caratteristiche, opzioni e implementazione. Le riduzioni dei costi del modem sono previste nell'ordine del 75-80 percento per Cat-M1 [4] e anche di più per NB-IoT con il suo set di funzionalità ulteriormente ridotto.
LTE Rel-14 inoltre, ha come scopo quello di migliorare ulteriormente LTE MTC e NB-IoT sia in termini di prestazioni che affrontando più use cases. Maggiori velocità ed efficienza saranno raggiunte in Rel-14 mediante una trasmissione di quantità maggiori di dati e l' aumento del numero di Hybrid Automatic Re-transmsission Query (HARQ) per consentire più trasmissioni parallele in attesa di feedback. La larghezza di banda del canale più ampia per LTE MTC (fino a 5 MHz), inoltre, migliora il supporto per streaming audio e voce e altre applicazioni. La Rel-14 consentirà applicazioni di posizionamento in cui la conoscenza della posizione del dispositivo è fondamentale, supportando segnali di riferimento avanzati che tengano conto della minore larghezza di banda NB-IoT / LTE MTC. La trasmissione multicast renderà più efficiente la consegna dello stesso contenuto a più

dispositivi, ottimizzando alcuni use cases come gli aggiornamenti del firmware ed il controllo sincrono di cose come, ad esempio, i lampioni. Il supporto per la classe di potenza NB-IoT inferiore di 14 dBm consentirà l'uso di batterie più piccole e dispositivi di supporto con un fattore di forma ridotto.

La copertura per il supporto voce LTE MTC sarà migliorata in Rel-14 aumentando la copertura VoLTE per FDD / TDD halfduplex attraverso tecniche che riducono le ripetizioni in trasmissione DL, mediante nuovi fattori di ripetizione e ritardi di pianificazione regolati. Gli use cases di mMTC beneficeranno anche di alcuni altri miglioramenti apportati a LTE Rel-15, tra cui:

- miglioramenti della latenza risultanti dalla multiplazione della segnalazione durante le transizioni di stato (segnalazione del resume user-data con connessione);
- miglioramenti dell'efficienza derivanti dall'accesso migliorato / controllo del carico nelle modalità inattiva e connessa;
- miglioramenti della durata della batteria dovuti al mancato rispetto dei requisiti di monitoraggio DL in modalità inattiva;
- adeguamento per il supporto dei Wearable devices .



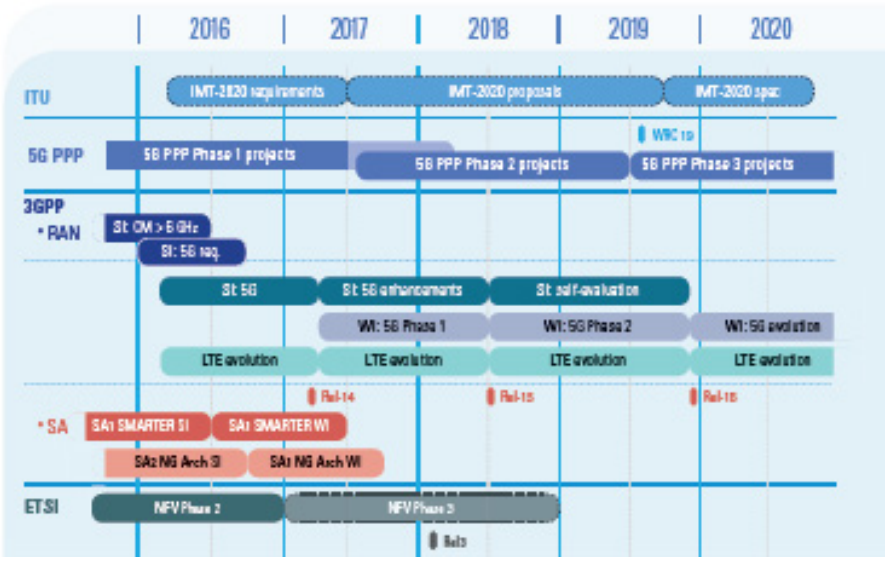


Source: Recommendation ITU-R M.2083-0

Lo standard 5G

Ci sono due filoni paralleli che compongono la roadmap di accesso alla radio 5G in 3GPP [1,2]: uno è basato sull'evoluzione di LTE e l'altro sull'accesso New Radio (NR). LTE-5G è caratterizzato da significativi miglioramenti di funzionalità esistenti per consentire il supporto del maggior numero possibile di requisiti 5G e use cases, con il requisito fondamentale di assicurare la compatibilità con le infrastrutture esistenti. NR-5G, invece, è esente da requisiti di backward compatibility con le infrastrutture già installate, ed è quindi in grado di introdurre cambiamenti più radicali, come l'utilizzo dello spettro a frequenze alte (mm-wave). Tuttavia, NR dovrà essere progettato in modo scalabile in modo che alla fine potrebbe essere migrato alle frequenze che sono attualmente servite da LTE.

Nonostante le prospettive per NR-5G sono entusiasmanti, è stata definita una ben solida evoluzione della tecnologia LTE che permetta una transizione graduale a 5G. A tale scopo sono stati definiti sia miglioramenti di funzionalità esistenti che estensioni di nuove funzionalità quali: i) miglioramenti delle velocità dei dati dell'utente (user data rate) e della capacità del sistema con FD-MIMO, ii) il miglioramento di impiego in ambiente non licenziato e iii) la riduzione della latenza sia nel piano di controllo (CP) che nel piano utente (UP). I miglioramenti in Rel-14 e Rel-15 mirano anche a fornire, inoltre, un supporto migliore per use case come MTC massiccio, critical communications e ITS.



Incrementi di User datarate e miglioramenti della capacità del sistema

L'utilizzo di tecniche FD-MIMO e la capacità di operare anche in ambiente non licenziato sono le due caratteristiche principali delle prossime versioni di LTE che hanno lo scopo di migliorare la velocità dei dati utente e la capacità del sistema che soddisfano gli standard 5G.

FD-MIMO

Il miglioramento delle tecniche MIMO in 3GPP rende possibile l'utilizzo di array di antenne bidimensionali con molteplici elementi irradianti, che possono essere orientate in modo da adattare dinamicamente la trasmissione sia verticalmente che orizzontalmente. Il concetto di FD-MIMO nelle future versioni di LTE si basa sui meccanismi di feedback delle informazioni sullo stato del canale (CSI) facente uso di codici matriciali precodificati che nella release LTE Rel-13 permettono di raggiungere un massimo di 16 porte di antenna. Inoltre segnali di riferimento CSI non precodificati (CSI-RS) vengono trasmessi da ciascuna antenna e trasmessi nella cella e il precoder viene derivato dal terminale. LTE Rel-13 ha anche introdotto un altro tipo di feedback CSI con CSI-RS a forma di raggio specifico del terminale, che permette alla stazione base di decidere la direzione del segnale trasmissivo (beamforming) per ciascun terminale piuttosto che essere derivata dal feedback del terminale stesso.

Per migliorare sia l'operazione CSI-RS non precodificata che con beamformed, Rel-14 introduce diverse nuove funzionalità, tra cui la modalità ibrida CSI non precodificata / beamformed con feedback ottimizzato; l'innesco aperiodico delle misurazioni CSI-RS; il supporto per un massimo di 32 porte antenna.

La modalità ibrida CSI non precodificata e beamformed con feedback ottimizzato consentirà la trasmissione intermittente di un CSI-RS iniziale non precodificato. I terminali possono quindi rispon-

dere con la direzione desiderata per un secondo CSI-RS con beamform in modo più frequente.
L'attivazione aperiodica delle misurazioni CSI-RS facilita il raggruppamento delle risorse CSI-RS, l'uso efficiente delle risorse di misurazione e la riduzione dei costi generali CSI-RS. Di conseguenza, più terminali nella cella avranno accesso al funzionamento CSI-RS con beamform.
Il supporto per 32 porte d'antenna abilita, inoltre, il funzionamento basato sul feedback di massicce configurazioni di antenna, che aumentano i guadagni del MIMO multiutente (MU-MIMO). Il feedback CSI avanzato include informazioni sui percorsi di propagazione di più canali, in modo che l'interferenza tra terminali co-programmati possa essere evitata o soppressa permettendo un miglioramente significativo delle prestazioni.

Operazioni LTE in spettro non licenziato

Per soddisfare le crescenti richieste di traffico, molti operatori di rete stanno prendendo in considerazione l'uso complementare dello spettro senza licenza. La tecnica utiizzata, denominata Licensed Assisted Access (LAA) è stata introdotta in LTE Rel-13 per il funzionamento Down Link (DL), ed è stata migliorata in Rel-14 per supportare la trasmissione Up Link (UL). LAA utilizza la tecnica di Carrier Aggregation (CA) per combinare una cella primaria a banda con licenza (PCell) con celle secondarie a banda non licenziata (SCells). Di solito le SCell hanno una potenza di trasmissione limitata, il che si traduce in aree di copertura più piccole di quelle che PCells è in grado di fornire. In questo contesto, un PCell fornisce una copertura affidabile per i messaggi di controllo e il traffico ad alta priorità, mentre le SCells forniscono una grande quantità di spettro e alte velocità di trasmissione dati quando disponibili.

Diverse soluzioni sono state incorporate in 3GPP per ottenere la coesistenza con altre tecnologie, come WLAN, che operano nella stessa banda di LAA. Questi includono la misurazione / selezione della portante dinamica, il protocollo Listen-Before-Talk e la trasmissione discontinua con durata massima limitata. La gestione intelligente ed adattativa del traffico tra vettori con licenza e i vettori senza licenza - e tra vettori senza licenza - potrebbero anche migliorare ulteriormente la convivenza.
Ulteriori miglioramenti della LAA sono attesi in LTE Rel-15, in particolare la trasmissione delle informazioni di controllo UL e il supporto dei canali ad accesso casuale sulle SCells senza licenza. Ciò consentirebbe di scaricare più traffico dalla banda PCells con licenza e consentire un'ulteriore distribuzione e abilitare casi d'uso come radio collegate in fibra. Infine, Rel-15 può abilitare le operazioni MTC in uno spettro non condiviso.

Riduzione della latenza

Un altro aspetto importante del miglioramento LTE è l'implementazione delle tecniche di riduzione della latenza per i piani utente e di controllo (UP e CP). La riduzione della latenza non solo contribuisce ai miglioramenti della velocità dei dati, ma consente anche nuovi use cases come Critical communications e ITS.

Riduzione della latenza del piano utente

Implementare un accesso nella direzione Up Link (UL) veloce è il primo passo verso la riduzio-

ne della latenza dei dati utente (User plane-UP). Come specificato in Rel- 14, l'accesso UL veloce consente di configurare un terminale con uno "slot" di uplink disponibile in ogni millisecondo, da utilizzare solo quando sono presenti dati di collegamento da trasmettere. Utilizzando l'accesso basato sulla richiesta di schedulazione corrente (SR), il terminale deve trasmettere una richiesta, attendere di aver assegnato lo slot e quindi attendere di utilizzarlo. Il meccanismo di fornire un accesso preconfingurato in UL riduce al minimo il tempo di attesa, riducendo di oltre la metà il ritardo medio dell'accesso radio per i dati di uplink.
L'altro passo di riduzione della latenza consiste in due miglioramenti che sono entrambi mirati per le specifiche in Rel-15. Il primo è un tempo di elaborazione ridotto: il terminale risponde ai dati di downlink e alle richieste di accesso di uplink in tre millisecondi anziché quattro. Il secondo è il introduzione di intervalli di trasmissione più brevi (TTI) che permettono di accelerare l'intera catena. Con un TTI corto, le trasmissioni possono essere fatte con una durata più breve (un minimo di un settimo della lunghezza di un normale TTE LTE). In ognuno di questi TTI breve le trasmissioni possono essere programmate separatamente con un nuovo canale di controllo in banda DL, con feedback inviato in un nuovo canale di controllo UL. La schedulazione e la retroazione sono inviate in sottotrame adiacenti per il tempo di trasmissione più breve, risultando in un ritardo di trasmissione unidirezionale di accesso radio totale di circa 0,5 ms, compreso il tempo di elaborazione dei dati.

Riduzione del segnale durante le transizioni di stato

Le transizioni di stato LTE implicano una segnalazione significativa: passando dallo stato idle (RRC_IDLE) a quello connected (RRC_CONNECTED) si ottengono 9 trasmissioni attraverso l'interfaccia aerea. Nella Rel-13 sono state introdotte le seguenti due opzioni per la riduzione del segnale nella fase di Idle e relativamente alla funzione di DoNAS per la security dei dati:

a) La funzione di idle/connected del segnale consente di sospendere temporaneamente la connessione dati e di memorizzare il contesto nel RAN e nella rete principale (Core Network- CN) durante la fase di " RRC_IDLE". Alla successiva transizione a RRC_CONNECTED, la connessione riprende con il contesto memorizzato, riducendo significativamente la segnalazione a quattro o cinque trasmissioni.
b) La funzione DoNAS raggiunge una riduzione simile della segnalazione omettendo la sicurezza degli strati di accesso (AS) e trasferendo i dati sul Control plane (CP) invece di stabilire i portatori di radio Use Plane (UP) tradizionali.

Per soddisfare il numero sempre crescente di dispositivi, volumi di dati di ridotte dimensioni e / o rari e requisiti di ritardo più stringenti, Rel-14 e Rel- 15 mirano a un'ulteriore riduzione della segnalazione tra terminali e nodi di rete (RAN e CN).
In Rel-14, la funzione di idle/connected viene migliorata riducendo la segnalazione tra la stazione base (BS) e la Core Network (CN). In Rel-13, la connessione BS-CN viene rilasciata insieme alla connessione di interfaccia aerea. Per esempio, in Rel-14, la connessione BS-CN può essere mantenuta quando la connessione del terminale BS è sospesa. I nodi di RAN si assumono la responsabilità di effettuare il paging del terminale all'arrivo dei dati DL.

Inoltre Rel 14 e Rel 15 permettono due ulteriori riduzioni di latenza del piano di controllo. Il primo è un miglioramento che consente una più rapida trasmissione dei dati rendendo possibile la multiplazione dei dati di portante radio UP con la segnalazione di ripristino della connessione. Il secondo è noto come release assistance indication, che consente al terminale di indicare che non ha più dati UL e che non anticipa i dati DL, consentendo in tal modo una transizione anticipata allo stato idle (RRC_IDLE).

Nuovi servizi e applicazioni 5G

Il 5G abilita nuovi use cases in particolare nell'ambito dei Verticals supportandone la Digital Transformation.

Use cases	Impact on Industry	Critical requirements	Estimated value
Improvements in Vehicle-to-everything communications (supporting the move to autonomous vehicles) and allowing for features such as collision avoidance, emergency braking, intelligent traffic systems	Improved safety	Latency Connection density Mobility	< 5 ms > 10,000 /km2 > 200 km/h
Infotainment services	New opportunities for the provision of in-car entertainment and information services of value to the driver and passengers	Data throughput Connection density Mobility	> 10 Mbps > 10,000 /km2 > 200 km/h
Platooning	Improved safety and efficiency	Latency Reliability	< 5 ms > 99.99999%
Data collection	Generation of large amounts of telemetry data opens up opportunities for new charging and insurance models	Data throughput Connection density Mobility	> 10 Mbps > 10,000 /km2 > 200 km/h
Remote monitoring and predictive maintenance	Efficiency improvements	-	-
Driver assistance - 'see through' the front vehicle, in-dash junction cameras (for HGVs for example)	Improved safety	Latency Data throughput Mobility	< 5 ms > 10 Mbps > 200 km/h

Source: DotEcon and Axon based on publicly available information

I principali settori industriali che beneficeranno del 5G sono i seguenti:

Automotive & Transportation (ITS)

L'evoluzione dello standard LTE prevede una versione adattata al mondo automotive – LTE V2X – per fornire connettività tra veicoli (V2V) e tra veicoli ed infrastrutture (V2I) in alternativa a standards della famiglia IEEE . Entrambe le tecnologie operano in banda libera 5,9 Ghz, non sono interoperabili mentre sono in studio i meccanismi di coesistenza tra i due standards. Mentre alcune

case automobilistiche hanno cominciato ad adottare lo standard IEEE quello basato sull'evoluzione 4G diventerà lo standard di fatto grazie ad iniziative come EATA e 5G AA.
Gli use case in ambito automotive e transportation basati su 5G comprendono:

- Vari gradienti di automatizzazione della guida, dalla guida assistita es. see though collidance avoidance, frenata di emergenza sino a quella pienamente connessa & autonoma che sfruttano le comunicazioni V2X
- L'infotainment di bordo
- Il platooning ovvero la guida in carovana dei TIR
- Servizi big data grazie ai dati raccolti dalle vetture, ora potenziate da nuovi algoritmi di analytics anche basati su AI

Tali servizi potranno diventare ancora più rilevanti con l'affermarsi dei veicoli a propulsione elettrica.

Media & Entertainment

Use cases	Impact on industry	Critical requirements	Estimated value
Supporting high quality data services in dense areas for improved viewing experiences and sharing of user and machine generated content	Will allow users to engage with media services at large events and may support the emergence of new, data hungry services which spectators at events will be encouraged to use to enhance their viewing experience	Data throughput Connection density Latency	> 15 Mbps > 150000 /km2 < 10 ms
Immersive media	Support the emergence of interactive media and improved, immersive video	Data throughput Latency	> 30 Mbps < 10 ms
New distribution technologies	Allows for a shift away from traditional distribution towards IP and to explore the use of multicast and broadcast modes over wireless networks	Data throughput Reliability Latency	> 10 Mbps > 99 % < 10 ms
Cooperative/off-site media production	Helps to remove production from resource heavy, on-site, outside-broadcast units to a central location potentially bringing cost savings and more efficient use of resources	Data throughput Reliability Latency	> 15 Mbps > 99.9999 % < 10 ms

Source: DotEcon and Axon based on publicly available information

Il 5G abiliterà la fruizione in mobilità di nuovi formati quali il 4K e 8K in modalità HDR attualmente in fase di diffusione su televisori e proiettori cinema. Permetterà inoltre nuove modalità di fruizio-

ne dei contenuti come l' Augmented Reality (AR), il Virtual Reality (VR) e il Mixed Reality (MR) che richiedono bande maggiori e minor latenza rispetto al 4G.
Inoltre permetterà anche la produzione dei contenuti in loco e la loro distribuzione ad oggi realizzato con tecnologie proprietarie.

Smart Manufacturing & Logistica

Il 5G potrà abilitare i concetti di I4.0 attualmente preclusi dal 4G in quanto richiedono in particolare servizi a bassissima latenza. I servizi di I4.0 spaziano dall'automazione industriale alle macchine a guida autonomo in ambito industriale, dai droni sino ad arrivare a concetti di "operai aumentati" capace di lavorare in simbiosi con tecnologie di tipo realtà aumentata ("cobots").

Use cases	Impact on industry	Critical requirements	Estimated value
Cell automation: devices in an assembly line and control units communicate wirelessly	Flexible and highly efficient production	Latency Reliability	< 0.5 ms >99.99999%
Automated guided vehicle: autonomous vehicles to transfer goods in a factory	Increased safety, efficiency	Mobility Reliability	> 10 m/s > 99.999%
Process automation: a high number of low maintenance sensors and actuators communicate wirelessly with control units	Increased efficiency, flexibility, lower inventory	Reliability	>99.99999%
Logistics tracking: track flow of goods from raw material to delivery	Increased efficiency (cost and time)	Connection density	> 1000000 /km^2
Remote assistance and robot control: remote control of robot to fulfil operations such as measurements, digging	Increased product/process quality	Reliability	> 99.999%
Augmented reality (AR): live direct or indirect view of a physical environment for training and maintenance	Increased efficiency, worker satisfaction, safety	Data throughput	> 500 Mbps

Source: DotEcon and Axon based on publicly available information

Use cases	Impact on industry	Critical requirements	Estimated value
IoT driven smart inventory management: Use of pallet tagging, cameras, sensors, automation to achieve damage detection, real time visibility and accurate inventory control	Enhance warehouse efficiency, ensure service quality	Connection density Battery life	> 1000000 /km^2 > 10 years
Optimal asset utilisation: Connecting machinery and vehicles to a central system to monitor all assets in real time and to enable predictive maintenance.	Reduce errors, increased workforce efficiency	Connection density Mobility	> 1000000 /km^2 > 100 km/h
Fleet and asset management: Use of sensors and wireless connectivity to create fleet efficiencies	Optimised routes, improved fuel economy, reduce deadhead miles	Connection density Battery life	> 1000000 /km^2 > 10 years
UAVs or Drone delivery: Use of drones to deliver packages by using a remote-control system	High speed delivery, access to low population zones	Reliability Latency	> 99.999% < 5 ms
Truck platooning: Platooning of delivery trucks equipped with mutually connecting smart technology.	Increase capacity and cost efficiency	Latency Reliability	< 5 ms > 99.99999%
Connected Ports: Devices, machines and humans sharing real time information to enable ports to work in a smarter way	Increase in trade, accurate tracking, secure ports	Connection density Battery life	> 200000 /km^2 > 10 years

Source: DotEcon and Axon based on publicly available information

eHealth

Il 5G abiliterà nuovi servizi di Telemedicina basati su concetto di Tactile Internet ovvero di risposta immediata di operatori a distanza abilitati dalla bassissima latenza. Permetteranno quindi l'assistenza a distanza che diventerà un sistema di sanità più sostenibile di quello centralizzato basato su cure solo ospedaliere.

Energy

Il 5G permetterà lo sviluppo delle Smart Grids oltre a migliorare i servizi di Smart Metering attualmente basati su tecnologie proprietarie o su NB IoT(4G).

Telecomunicazioni

Sono i corso di sperimentazione e di pre lancio commerciale in USA i servizi di Fixed Wireless

Access (FWA) basati su 5G, ovvero di sistemi di accesso fisso in cui il 5G sostituisce la fibra in casa, Tali sistemi sono basati su illuminatori di palazzi installati spesso su infrastruttura pubblica (es. lampioni, semafori) e usano frequenze millimetriche per trasportare bit rate dell'ordine dei Gbps.

Referenze

[1] Juho Lee et al., LTE-advanced in 3GPP Rel-13/14: an evolution toward 5G, IEEE Communications Magazine, March 2019: http://ieeexplore.ieee.org/document/7432169/

[2] ITU-R, IMT Vision – Framework and overal objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond, Recommendation ITU-R M. 2083-0, September 2015:
http://sss.itu.int/dms_pubrec/itu-r/R-REC-M.2083-0-201509-I!!PDF-E.pdf

[3] Alberto Rico-Alvarino et al., An Overview of 3GPP Enhancenents on Machine to Machine Communications, IEEE Communications Magazine, June 2016.

[4] 3GPP Technical Report 38.913, Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Tehnologies, October 2016:
http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.913/38913-e00.zip

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 8

INTERNET E LA SUA SICUREZZA

Tra tutte le tecnologie che stanno segnando maggiormente il contesto odierno, la sicurezza sta diventando un fattore importante anche per coloro che fino ad oggi avevano potuto rimanerne indifferenti o quasi. Infatti, l'uso di sistemi informatici nella vita quotidiana sta aumentando significativamente: dai mezzi di trasporto ai dispositivi medici, dalla produzione industriale alle tecnologie multimediali, dagli strumenti per la casa e la vita privata, fino alle apparecchiature professionali.

Sempre più informazioni personali sono registrate ed elaborate da un numero elevato di dispositivi, e la protezione di tali contenuti, per assicurarne un uso corretto, diventa un fattore chiave.

La sicurezza, inoltre, non riguarda più ogni singolo apparato visto in maniera separata ed indipendente dagli altri, ma va affrontata ad un livello macroscopico prendendo in considerazione tutte le interazioni che avvengono tra gli elementi in gioco, in un mondo che è sempre più connesso.

Si tratta, perciò, di misure non solo di tipo tecnologico, ma anche organizzativo, che devono coinvolgere in prima persona l'utilizzatore, che oggi è sempre meno esperto degli strumenti che adopera.

Motivazione per lo sviluppo

Affidando sempre più informazioni a dispositivi e sistemi, diventa sempre più importante aumentare il livello di sicurezza degli stessi, per proteggersi da nuovi attacchi che nascono grazie al mutamento degli scenari. Sistemi che una volta erano più semplici, stanno diventando ora sempre più ricchi e complessi, e questo ne aumenta intrinsecamente le vulnerabilità.

Inoltre, la tecnologia fa passi in avanti anche per gli strumenti d'attacco, che quindi richiedono sempre meno sforzi per l'esfiltrazione di informazioni sensibili.

Risulta quindi importante continuare ad investire nella ricerca e nell'innovazione in questo settore, con particolare riferimento alle seguenti tematiche.

Crittografia Post Quantum

Gli algoritmi di crittografia a chiave pubblica utilizzati oggigiorno si basano sull'utilizzo di problemi matematici difficili (come per esempio il calcolo di un logaritmo discreto o la fattorizzazione di interi). Data la complessità di tali problemi, il tempo necessario, per un malintenzionato, a ricavare la chiave privata di una vittima è paragonabile alla storia dell'universo, anche utilizzando il supercomputer più performante.

Con il futuro avvento dei computer quantistici, però, tali problemi possono essere risolti in maniera più efficiente, e quindi gli algoritmi crittografici a chiave pubblica maggiormente usati possono essere considerati vulnerabili.

Nel 2016 il NIST (National Institute of Standards and Technology) ha aperto un concorso per determinare quali saranno gli algoritmi a chiave pubblica utilizzati in uno scenario Post Quantum, in grado di resistere agli attacchi basati su algoritmi quantistici. Il concorso terminerà nel 2025 con la standardizzazione degli algoritmi che usciranno vincitori.
Sebbene qualche algoritmo di attacco quantistico sia stato definito diversi anni fa, ed alcuni di essi sono veri e propri punti di riferimento nelle analisi di sicurezza, lo studio di nuovi attacchi su algoritmi post quantum è un ambito in cui c'è ancora tanto da esplorare. Spesso, infatti, si trattava di lavori esclusivamente teorici, dal momento che non era possibile implementarli a causa dell'assenza delle tecnologie necessarie.
È proprio in questi anni che lo studio sui computer quantistici si sta facendo più concreto, aspetto che può rendere più proficua l'analisi di nuovi attacchi quantistici.
Per quanto riguarda gli algoritmi crittografici post quantum, invece, come già accennato precedentemente, essi possono servire come base per la crittografia a chiave pubblica e dovrebbero essere robusti anche in presenza di computer quantistici. Tuttavia, poiché per questi algoritmi non c'è sempre una garanzia di sicurezza, è necessario approfondire maggiormente questo tema. I candidati alla competizione post quantum si possono per lo più dividere nelle seguenti categorie: quelli basati sui reticoli, quelli basati sui polinomi multivariati, quelli basati sulle funzioni di hash e quelli basati sui codici. Di recente si stanno affermando anche algoritmi basati su isogenie tra curve ellittiche supersingolari.

La crittografia basata su reticoli sembra essere la tecnologia post quantum più flessibile: esistono realizzazioni efficienti di firme digitali, scambio di chiavi e cifratura a chiave pubblica che hanno garanzie di sicurezza molto elevate.
La crittografia multivariata è un'opzione interessante per le firme post quantum, in particolare sui dispositivi embedded.
La crittografia basata sui codici, infine, è la più antica, e alcuni la considerano l'opzione più sicura per la cifratura a chiave pubblica.
Da un punto di vista della ricerca in questo ambito, è interessante seguire l'evoluzione di questo concorso, analizzando i vari algoritmi proposti sia da un punto di vista teorico che da un punto di vista implementativo. In quest'ultimo caso, in particolare, è interessante caratterizzare tali algoritmi in base alla loro resistenza ad attacchi di tipo side-channel, che sono in grado di ricavare chiavi segrete o altri parametri di sicurezza analizzando grandezze come il consumo di potenza nel tempo del chip o la sua emissione elettromagnetica.

IoT

Il concetto dell'Internet of Things (IoT) è stato introdotto quasi vent'anni fa. Tuttavia, il suo effettivo impiego è iniziato negli ultimi anni, e il problema della sicurezza dei dispositivi connessi è entrata all'ordine del giorno solo recentemente, dopo aver visto che la maggior parte dei dispositivi connessi a Internet sono sprovvisti di una sicurezza robusta. A volte mancano i blocchi di sicurezza più basilari.
Secondo uno studio di Marsh (Global Risk Report 2018), gli oggetti connessi a Internet nel 2017 sono stati 8,4 miliardi, e si stima che essi raggiungeranno i 20 miliardi nel 2020 (dati Gartner).

Uno studio di Symantec, inoltre, rileva che un dispositivo IoT viene mediamente attaccato una volta ogni due minuti in alcune fasce orarie "di punta".

Oggetti che prima non erano pensati per essere connessi, ora si ritrovano esposti a possibili vulnerabilità che possono essere sfruttate in vari modi: dai più classici attacchi di tipo Denial of Service (DoS) o Distributed Denial of Service (DDoS), fino ad attacchi che possono mettere a rischio la vita umana (in particolare nel caso di dispositivi medici come pacemaker connessi), passando per il controllo remoto di sistemi di guida autonoma o dei sistemi di distribuzione di luce, gas e acqua.

Gli aspetti interessanti dal punto di vista della ricerca si possono racchiudere in tre grandi aree.

Da un lato è importante precludere a un attaccante di poter accedere allo stato interno di un dispositivo IoT, come ad esempio le chiavi crittografiche utilizzate nella comunicazione con altri dispositivi. Occorre studiare quindi possibili attacchi di tipo side-channel o fault, in cui un attaccante è in grado di ricavare la chiave segreta o altri parametri di sicurezza di un dispositivo IoT inferendo dall'analisi di grandezze come il consumo di potenza o di emissione elettromagnetica, oppure generando di proposito dei guasti nel dispositivo.

Dall'altro lato è importante proteggere la comunicazione tra i vari dispositivi IoT. Per connettere questi dispositivi tra di loro vengono principalmente utilizzate connessioni di tipo radio: dall'ormai consolidato Bluetooth ai più recenti 6LowPAN e LoRA, andando verso le reti 5G. È importante studiare queste tecnologie e caratterizzarle dal punto di vista della sicurezza, per scoprire in anticipo possibili vulnerabilità sfruttabili da malintenzionati per decifrare dei messaggi di una comunicazione tra dispositivi o alterarne il contenuto.

Le nuove versioni dei protocolli TLS, usato per la sicurezza end-to-end tra dispositivi che comunicano su una rete TCP/IP, e WPA, che fornisce protezione alle reti Wi-Fi, sono state completamente riprogettate per venire incontro a problemi di sicurezza delle loro versioni precedenti, come per esempio l'attacco KRACK per il protocollo WPA2 scoperto a fine 2017. Ma le scelte implementative sono state fatte anche per ritagliare meglio queste tecnologie a dispositivi IoT. Con l'ultima versione del protocollo TLS (1.3) è stato raggiunto un miglioramento in termini di sicurezza e velocità, ma le sfide nel suo utilizzo in ambito IoT sono ancora tante: basti pensare all'autenticazione tramite certificati le cui dimensioni possono andare oltre al Kilobyte, al peso computazionale richiesto dai più importanti algoritmi crittografici.

È importante quindi focalizzare lo studio su come questa tecnologia possa inserirsi in un contesto vincolato come quello dell'IoT, senza ridurre la sicurezza del dispositivo connesso.

Uno dei problemi maggiori nell'ambito della sicurezza dell'IoT, infine, è il fatto che le funzioni crittografiche più utilizzate oggigiorno richiedano un peso computazionale e di memoria eccessivo rispetto a quanto possono fornire i dispositivi connessi. Una soluzione utilizzata, e in cui la ricerca è molto attiva, è quella di usare coprocessori hardware in grado di accelerare notevolmente queste funzioni.

La ricerca di soluzioni per la sicurezza dell'IoT passa anche dalla definizione di nuove funzioni crittografiche. Il NIST ha recentemente aperto un concorso per standardizzare nuovi algoritmi crittografici "leggeri" (lightweight cryptography) che possano essere utilizzati in ambienti estremamente vincolati in termini di risorse.

Blockchain

Le blockchain si sono moltiplicate e diffuse a partire dal 2009, anno in cui è nato Bitcoin, seppur soprattutto ancora in fase sperimentale. Nonostante inizialmente siano nate nel campo delle cryptovalute, si è cercato di utilizzarle in numerosi altri campi, non ultimo dei quali quello dell'IoT.
La blockchain, all'interno di un sistema in cui tanti utenti interagiscono tra loro scambiandosi informazioni, riesce a eliminare la necessità di avere un ente terzo, di cui tutti si devono fidare, che abbia il compito di verificare la correttezza delle operazioni svolte sul sistema.
Questa tecnologia, quindi, può essere molto utile nei sistemi formati da innumerevoli entità che necessitano di interagire l'un l'altro, per evitare un'utenza centrale sovraccaricata che, in caso di compromissione/guasto, possa mettere fuori gioco l'intero sistema.
È quindi importante riuscire a definire i contesti a cui poter applicare le blockchain, in particolare quelli riguardanti la sicurezza e la privacy. Per fare ciò è fondamentale analizzare le varie tipologie di blockchain, valutando pro e contro a seconda del contesto per il quale si vuole trovare una soluzione, studiando le criticità in termini di sicurezza e praticità. Per esempio, la complessità in termini di storage necessario ad ogni utente per salvare lo storico delle transazioni (per Bitcoin, oltre 170GB a giugno 2018) è destinato a crescere enormemente, al crescere delle utenze, e quindi delle transazioni, fino a risultare impraticabile in numerosi sistemi.
Sono state studiate e proposte numerose altre blockchain, alcune delle quali cercano di sopperire al problema appena descritto, ma che ancora non hanno trovato reali applicazioni.

Intelligenza Artificiale

L'Intelligenza artificiale si sta rapidamente affermando come uno dei trend principali per i prossimi anni: infatti, laddove non sono ancora stati scoperti/definiti algoritmi formali che possano risolvere un problema, si è studiato come un sistema informatico possa "apprendere" capacità decisionali in modo simile a come gli esseri umani imparano facendo esperienza. Questo, inoltre, consente al sistema di potersi adattare autonomamente nel tempo, al variare delle circostanze e degli ambienti in cui si trova.
Inoltre, grazie a questa tecnologia, è possibile creare sistemi che non debbano essere differenziati per il singolo utilizzatore in fase di design/costruzione, ma che si specificano autonomamente (ed in maniera più differenziata) in fase di utilizzo.
In questo contesto, si rende necessario capire come proteggere il sistema da manipolazioni esterne, compiute con lo scopo di alterare i processi di apprendimento e decisionali, interrompendo il servizio offerto dal sistema o facendogli prendere scelte differenti da quelle che dovrebbero essere prese.
Nonostante colossi come Amazon e Google stiano già offrendo soluzioni per la domotica che integrano componenti di IA, sono numerose le falle di sicurezza di tali sistemi che vengono identificate dai ricercatori. Non solo in termini di singoli bug che possono derivare da errori di implementazione o sviste di progettazione, ma innovativi attacchi che non esistevano su altre piattaforme, e che invece sono attuabili su queste nuove tecnologie (si veda, ad esempio, l'uso di ultrasuoni per impartire comandi vocali al sistema ad insaputa dell'utente).

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 9

TECNOLOGIE PER "ONLINE CONTENTS"

Parallelamente alla progressiva penetrazione delle tecnologie di accesso alla rete (PC, TV digitale interattiva, smartphone e device mobili) e a una sempre maggiore diffusione dei social media, si evidenzia la progressiva tendenza delle piattaforme digitali a coinvolgere gli utenti nella generazione e fruizione di contenuti multimediali (user generated contents) che si affiancano ai contenuti multimediali offerti dai tradizionali content provider. Tra i principali driver di questa tendenza troviamo:

- la progressiva digitalizzazione e migrazione online di contenuti fisici che influenza il settore della musica, giochi, quotidiani, case editrici ma anche contenuti personali (si pensi alla diffusione della fotografia digitale, alla possibilità di uploadare video);
- la convergenza su IP di contenuti multimedia real time e live (IPTV);
- la proliferazione di contenuti digitali e l'interoperabilità dei dispositivi elettronici IP-enabled che consentono ai consumatori nuovi modi per trasmettere in modo efficiente tra dispositivi contenuti video ad alta definizione (HD);
- la crescente penetrazione dei social media e la loro convergenza con altri media (es. social TV o mobile location based social network);
- condivisione dei contenuti digitali tra dispositivi elettronici, smartphone, set-top box (STB) e personal computer (PC) che offrono nuove opportunità di integrazione e condivisione (anche attraverso il sistema cloud computing) tra dispositivi collegati all'interno della casa.

La personalizzazione dei contenuti attraverso algoritmi di Intelligenza Artificiale consente inoltre una personalizzazione e targettizzazione dei contenuti e una maggiore profilazione dell'utente con conseguenti dibattiti legati alla privacy disciplinati dalla normativa GDPR.
La banda larga e le tecnologie mobili di quarta e progressiva quinta generazione rendono inoltre possibile la fruizione di contenuti multimediali a qualità sempre più elevata, Augmented and Virtual Reality creando nuove modalità di comunicazione.
A queste si aggiunge l'emergere dei servizi NFC. Attualmente tutti i dispositivi prevedono la funzionalità NFC che consentirà una veloce penetrazione di nuovi servizi legati al trasporto, retailing, pagamenti, couponing.
A questo scenario, inoltre, si accompagna in Italia e in Europa il processo di diffusione e sviluppo della televisione digitale interattiva (connected TV e social TV) dotata di connessioni ethernet/ADSL/wireless home networks. Questo settore potrà stimolare ulteriori evoluzioni del mondo della produzione e diffusione dei contenuti interattivi nonchè una più efficiente gestione degli spazi pubblicitari volti a raggiungere specifici target e a raccogliere dati dagli utenti anche attraverso l'utilizzo dei social media combinati al programma in onda.

In questa sezione, le tecnologie e applicazioni per i contenuti online vengono classificate distinguendo le modalità di utilizzo da parte dell'utente finale.

1. Tecnologie abilitanti la creazione di contenuti online: blogs, user generated contents e podcast

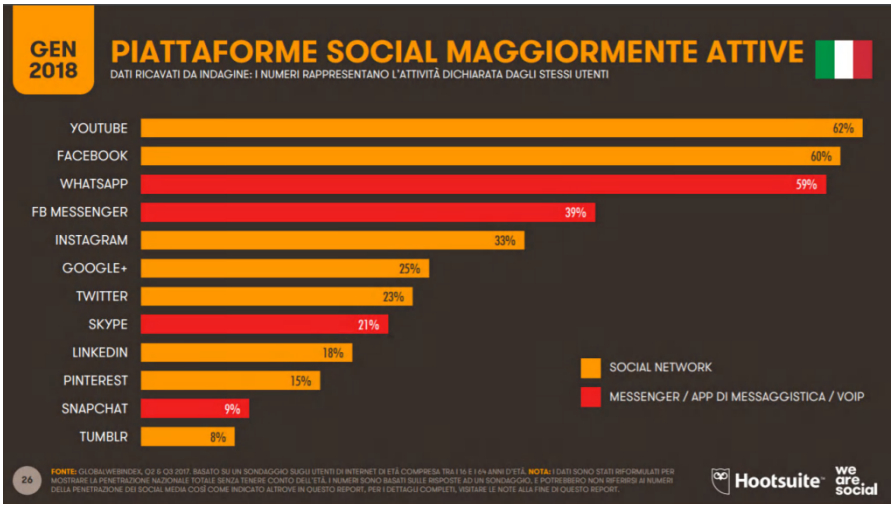
Nuove tecnologie e servizi consentono agli utenti la creazione di contenuti multimediali online personali (testuali, foto, audio e video) in modo semplice. Questi comprendono i "blog" siti web aggiornati costantemente dagli autori che trattano gli argomenti più vari dall'attualità alla cultura, e che assumono caratteristiche di multimedialità con l'evoluzione di audio blog e video blog. Altri siti consentono di pubblicare video (es. YouTube) o creare podcast e distribuirli come file video e audio (Apple's iTunes).

2. Tecnologie abilitanti la connettività tra individui: social network e mondi virtuali

I social network hanno raggiunto una notevole penetrazione del mass market. Ad oggi la popolazione mondiale su Internet è di 4 miliardi (erano 3,7 miliardi lo scorso anno) con un tasso di penetrazione del 53%. Gli utenti attivi sui social media a livello globale sono 3,2 miliardi (2,8 miliardi lo scorso anno, quindi +13%) con un tasso di penetrazione del 42%. In Europa, gli utenti online sono 674 milioni con una penetrazione dell'80%. In Italia la popolazione online raggiunge 43,3 milioni con un tasso di penetrazione del 73% che cresce del 7% rispetto al 2016. Gli utenti che usano i social media in Italia sono 34 milioni, con un tasso di penetrazione del 57%, un dato superiore, anche se di poco, alla media globale; era del 46% lo scorso anno.

Tra le piattaforme più usate in Italia, YouTube mantiene il suo primato, passando dal 57% dello scorso anno al 62% di quest'anno; subito dopo troviamo Facebook che passa dal 55% al 60%. Il balzo in avanti lo fa WhatsApp, passando dal 48% dello scorso anno al 59% di quest'anno.

FIGURA 1 – PIATTAFORME SOCIAL MAGGIORMENTE ATTIVE



Fonte: Report "We Are Social"2018 realizzato in collaborazione con GlobalWebIndex, GSMA Intelligence, Statista, Locowise, SimilarWeb

3. Tecnologie abilitanti la collaborazione: wikis e open source

In questi siti molteplici contributori condividono la responsabilità nella creazione e mantenimento dei contenuti tipicamente basati su testi e immagini. Il piu' conosciuto è Wikipedia, l'enciclopedia non profit people-generated con oltre 2 milioni di articoli. La stessa logica di cooperazione è alla base di altre forme di collaborazione online che includono prodotti software open source come Linux (una versione del sistema operativo Unix) Apache (Server Web) e Firefox (Web browser). In open source, tecnicamente gli sviluppatori combinano i loro sforzi per costruire, testare e migliorare i prodotti software utilizzando un codice è aperto a tutti.

4. Tecnologie abilitanti la possibilità di interazione: forum, rating e review

Oltre ai forum che consentono lo scambio di opinioni su tematiche attraverso post degli utenti altre tecnologie offrono la possibilità di attribuire una valutazione (rating) o effettuare una review e sono utilizzati come strumenti di interazione con i clienti da parte dei retailer ma anche come applicazioni a valore aggiunto nel caso di programmi televisivi da parte dei broadcaster.

5. Tecnologie per l'organizzazione dei contenuti: tags

- Servizi di "Video On Demand" (VOD), che offrono la visione su richiesta di contenuti multimediali messi a disposizione dal Service Provider. L'utente interagisce direttamente con il Service Provider per navigare, richiedere, ricevere e visualizzare il contenuto in tempo reale (streaming), avendo a disposizione le funzioni tipiche di un DVD (play, pause, rewind, fast-forward), i contenuti audiovisivi di proprio gradimento.
- Servizi di WebTV, dove videoclip sono visti all'interno di un browser internet, senza necessità di scaricare client o player SW, ne' di disporre di un box dedicato alla visione.

Particolare rilevanza assume inoltre la televisione ad Alta Definizione (HDTV) grazie allo sviluppo su reti broadband IP.

La varietà di terminali e la flessibilità di utilizzo imporranno di ridefinire i metodi di interazione con l'utente, si prevede infatti un graduale abbandono del tradizionale telecomando a favore di metodi interazione basati su funzionalità aggiuntive quali controlli inerziali via MEMS (a-la Wii), o direttamente attraverso il riconoscimento di gesti via telecamere (gesture recognition).

Un ulteriore filone di sviluppo è quello relativo alla televisione stereoscopica (3DTV) e/o free-viewpoint, dove l'utente può dinamicamente selezionare il punto di visuale.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

In linea con i contenuti dell'Agenda Digitale (progetto Europa 2020) della Commissione Europea appare rilevante individuare alcune motivazioni per lo sviluppo delle tecnologie di accesso ai contenuti online:

1. Migliore interoperabilità tra prodotti e servizi TLC attraverso maggiore sinergia fra dispositivi, applicazioni, banche dati, servizi e reti. Anche attraverso alcune norme adeguate sulla proprietà intellettuale si potrà raggiungere un interoperabilità di successo;
2. Stimolare la sicurezza online;

3. Offerta di un accesso a Internet molto veloce e a prezzi competitivi.

Relativamente alle attività di ricerca, in queste aree si possono individuare i seguenti temi di business e tecnologia:

- Lo sviluppo della robotica e Intelligenza Artificiale
- Lo sviluppo delle tecnologie NFC (Near Field Communications) impongono la ridefinizione dei modelli di business mobili e servizi forniti basati su nuove modalità di m-payment
- L'interoperabilità tra piattaforme di accesso e lo sviluppo della connected Tv aprono a nuove applicazioni e servizi con conseguente impatto sul mercato dei content e service provider

Queste tecnologie consentono la classificazione e organizzazione dei contenuti facilitandone l'accesso. Siti come Del.icio.us, Digg, Flickr sono esempi di siti che offrono questa possibilità.

6. Tecnologie per accelerare la fruizione: rss e widgets

Le tecnologie RSS (Really Simple Syndacation) offrono agli utenti la possibilità di ricevere aggiornamenti RSS su argomenti di interesse. Widget sono invece mini applicazioni per la connessione a Internet e hanno specifiche funzioni e sono utilizzati anche per accedere alle diverse applicazione attraverso la connected Tv.

***7.* Tecnologie abilitanti l'interazione con contenuti televisivi**

Oltre a Internet Tv (possibilità di accedere a contenuti televisivi da web), Tv interattiva (possibilità di interagire con il contenuto televisivo direttamente dalla TV) e mobile Tv (accesso a contenuti Tv da smartphone) appare rilevante segnalare lo sviluppo della social Tv che consente di fruire di contenuti televisivi unitamente alla possibilità di interagire e commentare attraverso l'utilizzo di social network. Questa nuova modalità di fruizione, già sviluppata in US e Asia e nella fase di lancio in Europa, consente di modificare la fruizione televisiva e il livello di "engagement" da parte dell'utente con effetti sul social commerce e la possibilità di una migliore profilazione dei clienti nelle diverse forme di advertisement integrato con i programmi.
La distribuzione televisiva, inoltre, assume caratteristiche multilivello: da Internet verso il terminale TV/STB principale della casa, e da quest'ultimo ad altri client fissi o mobili disseminati nella casa (place shifting).
Una serie di fattori molto differenti alimentano lo sviluppo dell'IPTV:

- fattori commerciali, quali la diffusione dei servizi broadband e la necessità degli operatori di intercettare la "seconda ondata" di utenti broadband dopo quella degli utenti Internet.
- fattori tecnici, quali la convergenza su protocolli IP delle architetture di rete, con costi decrescenti e possibilità di trasporto e commutazione di traffico in forte crescita, le nuove tecnologie di compressione del video, l'evoluzione delle tecnologie hardware relativamente alla costruzione dei terminali o delle memorie di massa.

Si possono classificare inoltre tre principali categorie di servizi televisivi:

- Servizi di "Broadcast TV", che garantiscono la fruizione contemporanea da parte degli utenti

di un "canale" televisivo tradizionale, Free-to-air o Pay TV, in maniera del tutto simile a quanto avviene sulla TV tradizionale. Nel caso di servizio Pay Per View, l'utente paga per vedere una trasmissione a un orario prestabilito. I servizi di Broadcast TV sfruttano tipicamente le funzionalità di Multicast presenti su una rete IP.

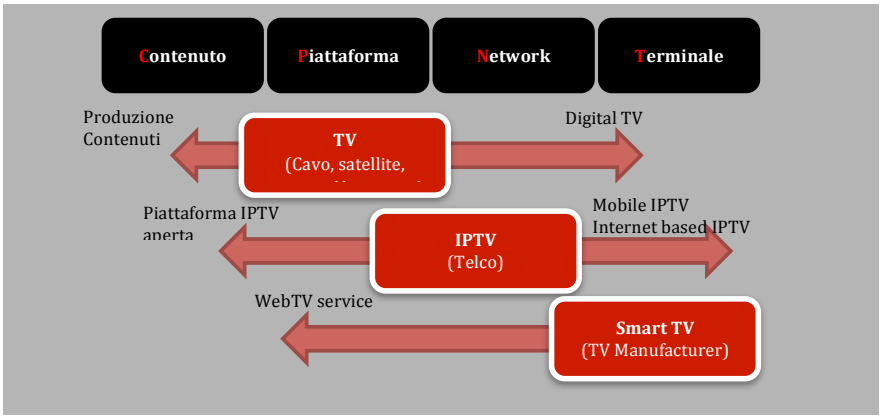
- Necessità di ridefinire i nuovi ecosistemi di valore in cui operatori con competenze specifiche lungo la catena del valore collaborano per creare un nuovo modello di valore per il cliente finale;
- Sistemi di codifica audio avanzati per musica online: codifiche evolute sia lossy che lossless sono alla base della rivoluzione della musica online;
- Sistemi di codifica video di nuova generazione per compressione e qualità: in particolare lo standard Mpeg4 AVC/H264 è un vero e proprio abilitatore, per i risparmi di banda che permette, per l'evoluzione dei servizi e della qualità dei contenti(quest'ultima resa necessaria per l'evoluzione dei servizi tipo IPTV verso il mondo della TV ad alta definizione (720p e 1080p). Per l'evoluzione a piu' lungo termine (2k, 4k), dovranno essere sviluppati nuovi codificatori.
- Sistemi di produzione e trasmissione in rete con modalità peer-to-peer di contenuti su piattaforme quali i STB multimediali. In questo caso, ogni terminale potrà assumere il ruolo di sorgente di contenuti per tutti gli altri "peer" collegati o di fruitore di contenuti ottenuti dagli altri peer. La distribuzione Peer to Peer potrebbe inoltre essere utilizzata per la diffusione di TV da parte dei broadcasters classici (EBU) o per servizi di VoD.
- Sistemi di protezione dei contenuti (Digital Rights Management, watermarking), per rendere possibili nuovi modelli di business: e' opinione largamente condivisa che senza una efficace protezione dei contenuti digitali la introduzione in rete di contenuti di qualità da parte dei grandi editori sara' a forte rischio.
- Sistemi di classificazione e ricerca dei contenuti attraverso l'analisi statistica del testo questi algoritmi potranno essere utilizzati anche per profilare l'utente e personalizzare il contenuto pubblicitario da inviargli.

Tutte queste tecnologie sono in stato di forte evoluzione e spesso si trovano nella fase ancora precedente alla standardizzazione. Vi sono importanti necessità di lavorare o in direzione di una standardizzazione efficace o della produzione di sistemi industriali conformi agli standard consolidati.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Con riferimento alla piattaforma TV i principali operatori per lo sviluppo del mercato sono: Piattaforme TV (cavo satellite, terrestre, fibra ottica) / Telco (IPTV providers) /Smart TV manufacturer che espandono le proprie aree di servizio (figura 2).

Si assiste in Italia e in Europa a una rilevante crescita della penetrazione broadband e dello sviluppo della televisione digitale interattiva. Nella fase di lancio in Italia è la connected TV mentre ancora poco sviluppata rispetto alle esperienze estere appare la social TV.



Di particolare rilievo in Italia e all'estero è la penetrazione dei social media che aprono nuove opportunità di business per le aziende (brand page in location based social network) e servizi (social TV). Ancora poco sviluppato in Italia appare a riguardo lo sviluppo dei servizi avanzati da parte delle aziende che si avvalgono di questi network sociali con opportunità di geolocalizzazione (es. Foursquare)

SETTORE 6

>MICROELETTRONICA E SEMICONDUTTORI<

MEMBRI DEL GRUPPO DI LAVORO

Settore – Microelettronica e semiconduttori

Coordinatori	
STMICROELECTRONICS	**Mario Scurati**
POLITECNICO DI MILANO	**Alberto Corigliano**
Componenti	
BIRD & BIRD	**Alberto De Ros**
CNR	**Grazia Tallarida**
ELETTRA SINCROTRONE TRIESTE	**Daniel Lizzit**
ENEA	**Girolamo Di Francia**
ERICSSON TELECOMUNICAZIONI	**Antonio D'Errico**
	Tommaso Catuogno
INSTM	**Giovanni Neri**
LFOUNDRY	**Sergio D'Alberto**
STMICROELECTRONICS	**Roberto Annunziata**
	Guido Chiaretti
ASSING	**Giuliano Casati**

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 1

INTEGRAZIONE DI SISTEMI ELETTRONICI SU SILICIO

Le piattaforme BCD (Bipolare-CMOS-DMOS) sono tecnologie multifunzionali per l'integrazione su silicio di sistemi elettronici complessi comprendenti blocchi analogici, logici, componenti di potenza e Memorie Non Volatili.
Le piattaforme BCD permettono di integrare nello stesso chip componenti bipolari, adatti per realizzare funzioni analogiche precise, dispositivi CMOS ottimali per realizzare blocchi logici, strutture DMOS scelta migliore come componenti di potenza capaci di sostenere alta tensione, memorie non volatili (NVM). Le tecnologie BCD entrano in un'ampia gamma di applicazioni che richiedono un intervallo esteso di tensioni di alimentazione. Perciò lo sviluppo delle piattaforme BCD ha visto la diversificazione in varie famiglie per poter soddisfare le richieste di utilizzo nei vari campi di applicazione. Le architetture di processo utilizzano sia substrati di silicio "bulk" sia substrati "SOI" (Silicon On Insulator).
Le famiglie BCD possono essere segmentate in (vedi fig. 18):

- BCD Alta Tensione (800V – isolamento galvanico fino a 6kV) tipicamente utilizzate in applicazioni industriali, illuminazione e Auto Elettrica.
- BCD su substrato SOI (20V – 200V) per soddisfare i requisiti di applicazioni particolari quali ad esempio l'ecografia ad ultrasuoni, pico-proiettori.
- BCD Avanzati (8V – 100V) usati in una grande varietà di applicazioni nel campo Automotive e Consumer.
- High Voltage CMOS (<40V) per realizzare interfacce sensori e prodotti analogici avanzati

La tecnologia BCD può essere classificata appartenente alla categoria cosiddetta "More than Moore" dove il progresso non dipende esclusivamente dall'evoluzione del nodo tecnologico, come nel caso delle tecnologie digitali "More Moore", ma dipende maggiormente dalla concezione e dall'offerta dei dispositivi integrati per soddisfare le richieste applicative. Comunque come in tutti i campi della tecnologia dei semiconduttori, la corsa verso la riduzione delle dimensioni litografiche ha svolto un ruolo importante nel determinare anche l'evoluzione delle famiglie BCD, procedendo però più lentamente rispetto all'evoluzione presente nelle piattaforme CMOS. Allo stato attuale, per i processi su silicio bulk è in produzione la generazione BCD da 0,11μm, ed è partita la progettazione per i 0,09μm (90nm), che saranno prodotti a 200mm e successivamente 300mm in STM ad Agrate Brianza.
Per i processi su substrati SOI, dopo la produzione della generazione da 0,35μm è in avvio di produzione quella da 0,16μm mentre il prossimo passo sarà lo sviluppo della generazione da 0,11μm.

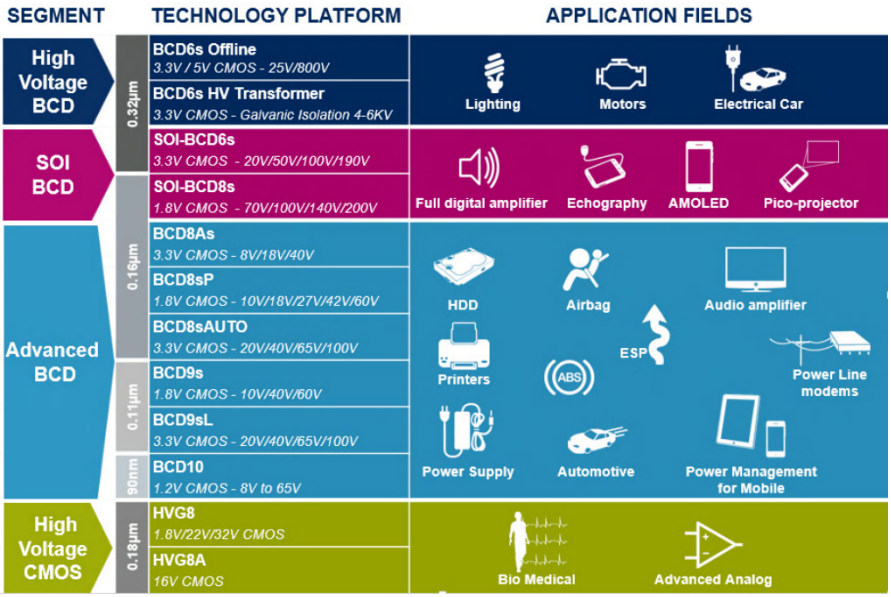


FIG. 18 FAMIGLIE BCD

Per l'integrazione su silicio di sistemi elettronici complessi sempre più performanti comprendenti blocchi analogici, logici, componenti di potenza e Memorie Non Volatili (Smart Power ICs), l'evoluzione verso nodi tecnologici avanzati si traduce in grande beneficio riguardo all'ottenimento di alta densità e velocità della logica CMOS integrabile, quindi le sfide principali si concentrano su:
Differenziazione o ottimizzazione delle architetture d'integrazione e isolamenti quali "a giunzione con diffusioni", "a giunzione con trincee profonde", "a dielettrico" con substrati SOI e trincee riempite di ossido di silicio.
Differenziazione dell'offerta dei dispositivi integrabili quali ad esempio strutture NVM con tecnologia "phase change" o PCM, nuovi materiali per integrare sensori magnetici, alti spessori di materiali dielettrici per ottenere funzioni d'isolamento galvanico pari a molti KV.
Nuovi schemi di metallizzazione (Cu-damascene, Cu-RDL, NiPd) per interconnessioni elettriche per poter gestire alte correnti e permettere la saldatura dei fili di connessione su piazzuole poste sopra aree attive di silicio.
Strutture innovative per realizzare i dispositivi di alta tensione e potenza poiché per questi ultimi i vantaggi derivanti dalla diminuzione delle dimensioni litografiche si stanno riducendo.
Le ricerche necessarie per sviluppare i nuovi processi, come sempre, riguarderanno attrezzature manifatturiere, processi di fabbricazione, metodologie di progetto, architetture dei dispositivi, nonché le metodologie di collaudo e i package. Le difficoltà tecnologiche principali sono legate alla diminuzione delle dimensioni fisiche e alla scalabilità degli elementi integrati, all'integrazione degli elementi ad alta tensione, alla riduzione della potenza dissipata, all'aumento di complessità di strutture e circuiti, al controllo delle difettosità di lavorazione e alle fluttuazioni del processo produttivo. Questa evoluzione introdurrà dei vincoli tecnologici molto severi che richiederanno

un'intensa attività di ricerca sui nuovi materiali da associare al silicio (integrazione eterogenea), nuovi processi (interconnessioni di rame, strutture SOI, dielettrici ad alta e bassa costante dielettrica), nuove architetture di componenti, nuove soluzioni circuitali, fette di silicio di maggior diametro, tecniche litografiche ottiche e post-ottiche. In generale sarà necessario integrare sullo stesso silicio diverse tipologie di transistori, ottimizzati per alte velocità, per basse dissipazioni, per alte tensioni e per funzionalità analogiche, per far fronte alle molteplicità di richieste delle applicazioni.

Nel campo della progettazione avrà valenza strategica lo sviluppo degli strumenti necessari per gestire la progettazione di circuiti di grande complessità quali compilatori, e librerie di blocchi circuitali riutilizzabili. Un ruolo sempre più importante sarà rappresentato dalla fase di verifica del progetto, per il quale saranno necessari strumenti di verifica della funzionalità sia ad alto livello (simulazione logica), sia a livello di layout (simulazione elettrica) su circuiti sempre più complessi, emulatori, e infine specifiche attrezzature di collaudo, che consentano di validare circuiti comprendenti non solo una grande quantità di porte logiche, ma anche funzioni analogiche e di potenza. Dal punto di vista tecnologico la capacità di integrare tecnologie differenti in sistemi complessi e sul medesimo chip rappresenterà in molti casi un obiettivo di maggior valore dell'ottimizzazione di una singola tecnologia per quanto importante possa essere.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Il mercato dei prodotti con tecnologia mista BCD si può associare a quello del mercato "Analogic" che nel 2017 ha fatturato globalmente 53B$, e WSTS prevede in crescita a 59B$ nel 2018 e 63B$ nel 2019. STM dagli inizi della produzione in tecnologia BCD ha sempre giocato un ruolo di primaria importanza nel settore e vuole proseguire a mantenere la posizione anche per i prossimi anni. Dagli inizi degli anni '80, anno di inizio produzione di componenti STM in BCD, ad oggi STM ha venduto complessivamente ~30 miliardi di componenti.

L'integrazione di componenti di tensione/potenza assieme a consistenti capacità digitali di elaborazione risponde alle richieste, diffuse ormai in quasi tutti i settori, di "potenza intelligente".

Storicamente il settore automotive ne rappresenta il campo applicativo più consistente, si pensi ad esempio alle tematiche di gestione motore ed ai sistemi di sicurezza attiva, seguito dal settore industriale e delle periferiche per computer, ma questo tipo di architettura è ormai diffuso ovunque, dalla gestione batterie per veicoli elettrici e dispositive portatili, al pilotaggio LED per illuminazione interna ed esterna, alle interfacce per sensori e attuatori MEMS e così via.

Anche il settore medicale si è già affacciato e certamente prenderà quota nel medio futuro.

Per mantenere il primato che l'Italia detiene nel settore dell'integrazione di potenza verso gli altri concorrenti, principalmente Texas Instrument e Freescale (US), Infineon e NXP (EU), Renesas e Toshiba (Giappone), TSMC (Taiwan), è essenziale riuscire ad avanzare costantemente nella tecnologia e nei prodotti per consolidare l'attuale posizione e soddisfare nuove richieste di mercato.

Un esempio di importante step in avanti è rappresentato dallo sviluppo della piattaforma BCD da 90nm idonea per essere prodotta su fette di silicio del diametro di 300mm e comprendente nuovi tipi di memorie non volatili (NVM). Per arrivare a ciò sarà importante un'attività preparatoria da farsi sull'attuale piattaforma BCD da 110nm.

La disponibilità di questo tipo di memorie su una piattaforma BCD consentirà di realizzare sistemi smart power su chip ad alta complessità comprendenti microcontrollori con abbinata memorizzazione di s/w e dati. Ciò permetterà di espandere la presenza sul mercato di prodotti BCD in applicazioni richiedenti codici di pilotaggio complessi e riconfigurabili assieme ad attuatori di potenza integrati in un singolo package.
Queste applicazioni entrano nel campo dell'Automotive (sia "power train" che "car body"), dei controllori dell'energia e "smart-meters" attraverso la "smart-grid", pilotaggi per lampade LED per spazi pubblici e domestici, sensori intelligenti, ecc.
Come sempre nella storia dello sviluppo delle piattaforme BCD da questo nuovo nodo tecnologico verranno derivate altre versioni con integrazione di componenti elettronici, nuovi materiali, capacità in reggere alte tensioni, personalizzate per soddisfare specifiche richieste di applicazioni standard e nuove.
Le motivazioni per lo sviluppo di questi concetti, che rappresentano l'asse portante dei semiconduttori, sono di tipo economico e allo stesso tempo di tipo strutturale per l'industria dei semiconduttori e dei sistemi elettronici.
In genere le motivazioni di tipo economico sono rappresentate da un mercato che, seppure oggetto a ciclicità, è caratterizzato da una crescita continua e dall'introduzione pressoché ininterrotta di nuove applicazioni rese possibili dall'elevato livello di complessità fisica e funzionale raggiungibile con i circuiti SoC.
In particolare tutte le previste applicazioni d'interesse pubblico (salute, assistenza agli anziani, servizi informatici distribuiti, accesso aperto ai servizi) sono basate sulla disponibilità di terminali di accesso mobili (smart phone, tablet PC, netbook) a bassissimo consumo e a basso costo. Le motivazioni di tipo strutturale sono in relazione al forte contenuto di sistema presente negli SoC che aumenta il valore aggiunto dei prodotti e crea l'opportunità per la nascita di nuovi centri di progettazione e società fabless (senza capacità produttiva).

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Il nome e la tecnologia BCD furono introdotti da ST a metà degli anni '80 in anticipo di qualche anno sulla concorrenza. Ciò ha permesso di realizzare e consolidare un primato nel campo tuttora presente con la generazione di molte piattaforme evolutesi in litografia, capacità di sostenere tensione e varietà di componenti integrati e con la costruzione di un solido know-how nel campo della progettazione specialmente nei campi di applicazione audio, automotive e industriale.
Inoltre da oltre trenta anni esistono in Italia attività di ricerca e produzione di circuiti integrati basati sulla tecnologia del silicio e di memorie Non Volatili a semiconduttore sia per memorizzazione di massa sia per applicazioni embedded.
In Italia esiste una solida attività di sviluppo di nuove tecnologie, e in particolare si sono create competenze di avanguardia nel campo delle memorie a cambiamento di fase (PCM: Phase Change Memories), per le quali è stato prodotto in Italia il primo dispositivo di memoria disponibile commercialmente.
Sono inoltre disponibili solide competenze di progettazione dei sistemi di memoria dedicati, con particolare riguardo alle applicazioni nei sistemi elettronici mobili e nell'automotive.

Come già detto i principali concorrenti sono:

- Texas Instruments presente nei segmenti di mercato computer peripherals, power management, audio consumer, industrial e automotive con tecnologie fino a 0,18μm.
- Freescale presente in campo automotive oggi propaganda una tecnologia 0.13μm su SOI.
- Infineon concorrente in campo automotive e industrial con tecnologie rispettivamente da 0.13μm e alta tensione.
- NXP concorrente in campo automotive, audio car-radio e consumer oggi propone una tecnologia 0.13μm su SOI.
- Renesas presente come NXP con tecnologia 0.18μm.
- Toshiba concorrente in applicazioni industriali e audio car-radio presenta una tecnologia da 0.13μm.
- Maxim, Linear Technology, Dialog concorrenti in power management per portatili
- Foundries (TSMC, Dongbu, Tower-Jazz, etc.).

All'estero i principali produttori di semiconduttori compiono grossi investimenti nell'area della progettazione/produzione di memorie, supportati, soprattutto in Asia da una politica mirata di sostegno pubblico. Le ricerche in corso in Italia sono qualitativamente in linea con quelle delle aziende più avanzate a livello mondiale e dispongono di strutture che utilizzano fette di silicio da 200 mm. Con riferimento alle applicazioni SoC l'America ha come punti di forza internet e informatica, mentre l'Europa eccelle nelle comunicazioni mobili, nell'elettronica dell'automobile e nelle carte elettroniche intelligenti. L'UE è una protagonista nella lotta al cambiamento climatico, infatti attraverso la sottoscrizione del Protocollo di Kyoto e la cosiddetta "Strategia 20-20-20", che consiste nel ridurre le emissioni di gas serra del 20%, alzare al 20% la quota di energia prodotta da fonti rinnovabili e portare al 20% il risparmio energetico, il tutto entro il 2020.
Data l'importanza che il tema ha assunto, si sono sviluppate molteplici iniziative in tutto il mondo da un lato per standardizzare i sistemi di misura dell'efficienza energetica delle piattaforme di telecomunicazioni di nuova generazione, quali ETSI EE, ITU SG5, ATIS EE, CoC, ecc. e dall'altro per sviluppare meccanismi e tecniche opportune su cui far leva per ottimizzare il consumo di energia sia statico che dinamico. I meccanismi di ottimizzazione dovranno essere realizzati senza introdurre limitazioni di funzionalità e/o cambiamenti sostanziali delle capacità operative sia degli apparati coinvolti, che della rete nel suo complesso.
Ciò sarà realizzato mediante l'introduzione, negli apparati e nelle interfacce, di capacità avanzate di standby e power dynamic scaling, estendendo convenientemente i protocolli di linea e di rete per supportare tali funzionalità e aggiungendo nel contempo, ai piani di controllo e di gestione, le funzionalità necessarie a realizzare opportunamente l'ottimizzazione del consumo. Sarà possibile raggiungere questi obiettivi sfruttando, in particolare, le nuove capacità degli apparati di entrare in stati di standby e di modificare la propria potenza elaborativa in funzione del consumo desiderato (power dynamic scaling).

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

300 milioni di euro

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 2

INTEGRAZIONE EMBEDDED-NON-VOLATILE-MEMORY SU SILICIO

Memorie Non Volatili Embedded

Negli ultimi anni le memorie non volatili (NVM) hanno acquisito un ruolo sempre più importante, confermando di essere un settore molto dinamico e soggetto a continua innovazione nel panorama dei dispositivi a semiconduttore.

La caratteristica fondamentale delle NVM è la capacità di mantenere dati in maniera permanente, anche in assenza di alimentazione.

Come si vede dallo schema seguente, sono state proposte varie soluzioni che, utilizzando diversi fenomeni fisici, soddisfano questo obiettivo.

Se la memoria viene integrata insieme con altre funzioni (logica CMOS, circuiti analogici, periferiche) su un medesimo chip realizzato con un flusso di processo modulare, si parla di memoria non volatile "embedded" (e-NVM).

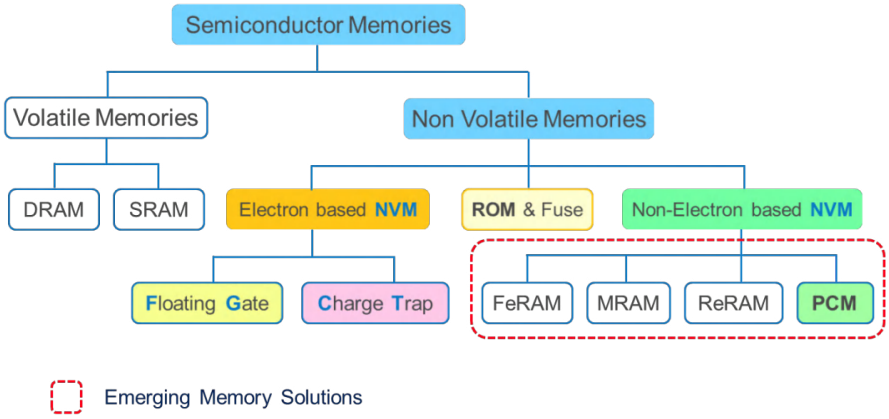


FIG. 19 CLASSIFICAZIONE MEMORIE SEMICONDUTTORE

Le architetture più consolidate, dimostrate su vari nodi tecnologici con produzione su larga scala, si basano sul confinamento di carica su un elettrodo isolato (Floating Gate memory) o all'interno di un dielettrico (Charge Trap memory) in modo da modulare le caratteristiche elettriche di un transistore MOS e quindi codificare gli stati logici "0" e "1".

Come si vede nella fig. 20, le più svariate applicazioni che utilizziamo nella nostra vita quotidiana oggi sono realizzate con microcontrollori (MCU) e altri circuiti integrati che contengono memorie non volatili.

Sempre più applicazioni richiedono la possibilità di aggiornare il codice durante la vita operativa del prodotto oppure memorizzare parametri che sono utilizzati per ottimizzare le prestazioni del sistema.

Le memorie e-NVM sono particolarmente adatte a rispondere a queste esigenze poiché permettono di realizzare interi sistemi su un singolo circuito integrato, soluzione obbligata nel caso di requisiti stringenti per velocità, riduzione della potenza dissipata e immunità al rumore.
Nel tempo sono state proposte diversi tipi di celle di memoria per venire incontro ad una estrema frammentazione delle dimensioni dell'array (da pochi kbit a molti Mbit) e dei profili d'uso dei dispositivi.
Ad esempio, un piccolo taglio di memoria e-NVM (<1kB) può essere utilizzato per memorizzare codici di sicurezza-identificazione, attivare la ridondanza in banchi di memoria volatile (SRAM), regolare le prestazioni analogiche del dispositivo. In questo caso si tratta di memorie soggette a un numero limitato di programmazioni per byte (OTP/FTP), dove il requisito più importante è ridurre al minimo il costo dell'integrazione della NVM. Spesso le soluzioni implementate (laser fuse, anti-fuse, Single Poly EEPROM) si realizzano senza introdurre nuovi moduli di processo e senza livelli addizionali di mascheratura.



FIG. 20 AUTOMOTIVE

L'altro estremo è costituito dai prodotti ad alte prestazioni, guidato dalle applicazioni "automotive" che richiedono funzionalità nell'intervallo da -40°C a 165°C e in grado di soddisfare requisiti di "zero difetti" in affidabilità, con tagli di memoria da 2MB a 16MB.
In questo caso il concetto di riferimento è la cella Flash NOR, sviluppata all'inizio degli anni '90, che permette di superare i limiti di scalabilità dell'architettura EEPROM a due transistori. È stata prodotta su larga scala per memorie di massa e rappresenta l'architettura più studiata per quanto riguarda i meccanismi di fallimento.

MOTIVAZIONE PER LO SVILUPPO

Nonostante i punti di forza che abbiamo descritto, sono evidenti alcune limitazioni dell'architettura Flash NOR: l'organizzazione dell'array espone le celle non selezionate a disturbi elettrici durante le operazioni di programmazione e lettura, il consumo in programmazione è relativamente elevato, così come l'area addizionale dei circuiti che generano e gestiscono l'alta tensione necessaria per modificare il contenuto della memoria. Per superare queste difficoltà sono state proposte molte strutture alternative per la cella di memoria, sempre basate su uno schema NOR che semplifica l'integrazione con il processo CMOS. Alcuni esempi per il nodo tecnologico a 90nm sono riportati nella fig. 21, dove sono evidenziate anche le principali caratteristiche delle varie soluzioni.

Tutte queste opzioni si possono ricondurre al concetto di "split-gate", dove viene introdotto un transistore di selezione condiviso da una coppia di celle che permette di attivare un meccanismo di programmazione "source side injection" (SSI), in alternativa a "channel hot electron" (CHE) utilizzato nella Flash convenzionale.

40nm node	1T NOR	1.5T ESF3	1.5T SG MONOS	1.5T HS3P	1.5T SG TFS
Device Structure					
Prog/Erase	CHE /FN	SSI /FN	SSI / HHI	SSI/FN	SSI / FN
Pro's	High density	Power, LV read path	Power	Power	Power, LV read path
Con's	Power	Process complexity	Reliability	Process complexity	Concept Maturity
Company					



FIG. 21 PROS & CONS

Grazie a questa architettura la programmazione è più efficiente, i consumi vengono ridotti ed anche l'operazione di lettura richiede una tensione più bassa. Di conseguenza si può ridurre l'area della decodifica e dei circuiti per la programmazione della memoria, compensando in questo modo l'area della cella relativamente più grande.

Comunque tutte le memorie "floating gate" presentano alcune limitazioni strutturali che non possono essere superate: sono integrate nella parte iniziale del processo di fabbricazione e quindi hanno un impatto sulla logica CMOS, richiedono lo sviluppo di transistori dedicati in grado di generare le tensioni relativamente elevate richieste per il funzionamento della memoria che non scalano con l'evoluzione dei nodi tecnologici.

In sintesi, l'architettura "floating gate" è difficile da integrare in maniera efficace per quanto riguarda complessità e costi di processo, in particolare nel caso di CMOS avanzato (28nm ed oltre) dove non esiste alcuna sinergia con i moduli di processo (ossidi ad elevata permettività e gates metalliche) dedicati alla realizzazione dei transistori della piattaforma digitale.

Quindi è evidente la forte motivazione del mondo accademico e dell'industria microelettronica nel ricercare possibili alternative sia per l'architettura della cella di memoria che per nuovi schemi di integrazione di processo.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Memorie Resistive

Nell'ultimo decennio uno sforzo notevole a livello mondiale si è concentrato sullo studio di soluzioni alternative alle attuali memorie non volatili basate sull'immagazzinamento di carica elettrica. Industria, centri universitari e di ricerca hanno proposto approcci innovativi per garantire la continua miniaturizzazione delle memorie, sia per applicazioni di massa che di tipo "embedded". Nel primo caso il principale fattore trainante per gli sviluppi è il costo, nella secondo la compatibilità con la piattaforma CMOS in cui la memoria non volatile viene integrata. La classe delle memorie resistive contiene tutti i dispositivi programmabili il cui stato logico "0" o "1" corrisponde a diversi valori di resistenza o, più in generale, di impedenza. Un'idea dell'impegno delle maggiori industrie del settore sui vari filoni può essere fornita dalla fig. 22.

	FRAM	MRAM/STT MRAM	PCM	RRAM
Industrial & Transportation	RAMTRON, Panasonic, FUJITSU, LAPIS	EVERSPIN		Panasonic, adesto
Embedded MCU Smart Card		Infineon, RENESAS		
Cache Memory for Enterprise storage		SAMSUNG, EVERSPIN, SK hynix	SAMSUNG, Micron, SK hynix	
Mobile phones		TOSHIBA, QUALCOMM	SAMSUNG, SK hynix, Micron	
Mass Storage				SAMSUNG, Micron, SK hynix, TOSHIBA, SanDisk

FIG. 22 NON-VOLATILE MEMORY BY COMPANY SUPPLIER

Un resistore programmabile non volatile si può realizzare in microelettronica grazie all'introduzione di nuovi materiali, come nel caso delle memorie a cambiamento di fase PCM (Phase Change Memory), oppure mediante strati più o meno complessi di materiali già disponibili in una linea di produzione, come nel caso delle memorie resistive RRAM (Resistive RAM) o nel caso delle memorie a ponte conduttivo CBRAM (Conductive Bridge RAM). Le memorie a cambiamento di fase verranno discusse in maggior dettaglio nel paragrafo seguente.

Le memorie di tipo resistivo offrono come sicuro vantaggio rispetto alle soluzioni attuali la

possibilità di essere realizzate nella parte finale del processo di fabbricazione, ossia a livello delle metallizzazioni. Questo permette di minimizzare l'impatto della memoria sulla piattaforma CMOS, caratteristica particolarmente importante nel caso di applicazioni embedded, e di realizzare matrici molto dense, grazie all'intrinseca natura 3D della struttura. Il costo di processo è estremamente favorevole, grazie ai pochi livelli (dell'ordine di 2-3) di mascheratura litografica necessari per la definizione della memoria.

Per quanto riguarda le RRAM o CBRAM, il principio di funzionamento si basa sulla formazione e dissoluzione reversibile di un filamento conduttivo all'interno di un dielettrico in seguito all'applicazione di un campo elettrico di polarità opportuna.

Lo stato logico di un bit può essere alterato con bassi livelli di corrente (dell'ordine delle decine di ångstrom) e in tempi molto rapidi (dell'ordine delle centinaia di ns). Si tratta di soluzioni molto innovative, con un modesto livello di maturità (ossia lontane da una reale applicazione industriale), in quanto spesso basate su studi e caratterizzazioni a livello di singola cella di memoria.

L'affidabilità delle RRAM è ancora oggetto di ampie discussioni, in quanto un'accurata DESCRIZIONE dei principi chimico-fisici che ne regolano il funzionamento dipende strettamente dalla sequenza di strati/materiali utilizzati. In molti casi, infatti, per ovviare a problemi di scarsa ritenzione del dato ad alta temperatura, si interviene sui materiali utilizzati per migliorarne le prestazioni. La previsione del comportamento in ritenzione per tempi lunghi è ancora un punto piuttosto debole delle RRAM.

Le memorie STT-MRAM (Spin Torque Transfer Magnetic RAM) rappresentano un'altra classe di dispositivi su cui si sta concentrando l'interesse di alcune tra le principali industrie (TDK-TSMC collaboration, IBM-Sandisk alliance).

Il principio di funzionamento si basa sulla modulazione della corrente che attraversa una "magnetic tunnel junction" (MTJ) ottenuta in funzione della magnetizzazione applicata in fase di programmazione. La struttura MTJ è realizzata integrando numerosi strati sub- nanometrici di materiali ferromagnetici.

Lo stato logico di un bit viene modificato con bassi livelli di corrente (decine di ångstrom), in tempi molto rapidi (decine di ns), senza significative limitazioni di endurance. Queste caratteristiche rendono la memoria STT-MRAM particolarmente interessante per applicazioni stand-alone (sostituzione DRAM). La ritenzione del dato ad alta temperatura è un aspetto cruciale per le applicazioni embedded e, al momento, è un punto debole per l'architettura STT-MRAM: scalando la dimensione dell'elemento di memoria, si riscontra un degrado delle prestazioni in ritenzione.

La Soluzione PCM

Il principio di funzionamento delle memorie a cambiamento di fase (PCM) si basa sulle proprietà specifiche di alcuni composti ternari noti come calcogenuri che derivano dalla presenza di elementi appartenenti al gruppo 16 della tavola periodica, come il tellurio (Te). Tali materiali sono noti da diversi decenni in ambiente industriale per applicazioni come la xerografia o la riproduzione audio/video su dischi ottici. Sono caratterizzati da uno stato cristallino stabile a elevata conducibilità e riflettività e uno amorfo metastabile caratterizzato da bassa conducibilità e riflettività. Le applicazioni dei calcogenuri nel campo delle memorie non volatili sfruttano la

diversa resistività degli stati amorfo e cristallino, facendo corrispondere allo stato logico "1" la fase cristallina altamente conduttiva.

Il materiale più largamente studiato e utilizzato nel campo delle memorie è il Ge-Sb-Te nella composizione stechiometrica 2-2-5. Negli ultimi 15 anni diverse architetture di cella sono state proposte per la realizzazione di matrici di memoria di varia densità e con ampia casistica di applicazioni.

Tra i vantaggi specifici di questo tipo di soluzione possiamo evidenziare la sua semplicità, dato che un solo materiale dedicato è da gestire a livello di integrazione. In comune con le altre memorie di tipo resistivo garantisce la velocità di scrittura (dell'ordine delle centinaia di ns), l'integrazione nella parte finale del processo e il basso costo (poche maschere aggiuntive). Inoltre lo stato logico della cella dipende dalla fase in cui si trova un volume di materiale, mentre le RRAM si basano sulla formazione/dissoluzione di un filamento, modalità che rende il funzionamento intrinsecamente più soggetto a fluttuazioni stocastiche. I calcogenuri sono composti ternari; è stato ampiamente dimostrato che una semplice variazione della composizione stechiometrica può modificare le proprietà elettriche della memoria. In particolare, si può ottenere un significativo aumento delle prestazioni di ritenzione agendo sul contenuto di Ge nel materiale.

Le PCM sono considerate come la soluzione più matura tra tutte le memorie emergenti: sono state utilizzate per la realizzazione di prodotti con dimensione del Gbit nel nodo tecnologico a 45nm.

La collaborazione Micron-Intel ha sviluppato una architettura innovativa (3D Xpoint) che integra un selettore unipolare e l'elemento di memoria PCM tra coppie di livelli di interconnessione, in strati sovrapposti. Il primo dispositivo da 128Gbit, realizzato in tecnologia da 20nm, è in produzione da Marzo 2017.

Questi dati dimostrano il livello di maturità e il processo di consolidamento dell'architettura PCM, già avvenuto a livello industriale. Lo stato amorfo è metastabile, nel senso che per tempi estremamente lunghi o temperature molto elevate il materiale tende a tornare allo stato cristallino. È stato solidamente dimostrato che il fenomeno segue la legge di Arrhenius in termini di cinetica e dipendenza dalla temperatura. È quindi possibile prevedere la stabilità del dato immagazzinato durante la vita del dispositivo (vale a dire la sua affidabilità).

Nella fig. 23 le prestazioni di ritenzione di una memoria PCM e del riferimento Flash sono confrontate con il profilo d'uso di un tipico prodotto automotive.

Si riconosce l'ottima stabilità dalla PCM a temperature relativamente basse (<150°C). Alle temperature più elevate la PCM può comunque garantire un ampio margine (2 decadi in tempo) rispetto al profilo d'uso dell'applicazione.

Infine le PCM sono le uniche memorie emergenti in grado di garantire la ritenzione del dato immagazzinato anche dopo esposizione al processo di saldatura del circuito integrato su scheda, che prevede un picco di temperatura di circa 260°C per alcuni minuti.

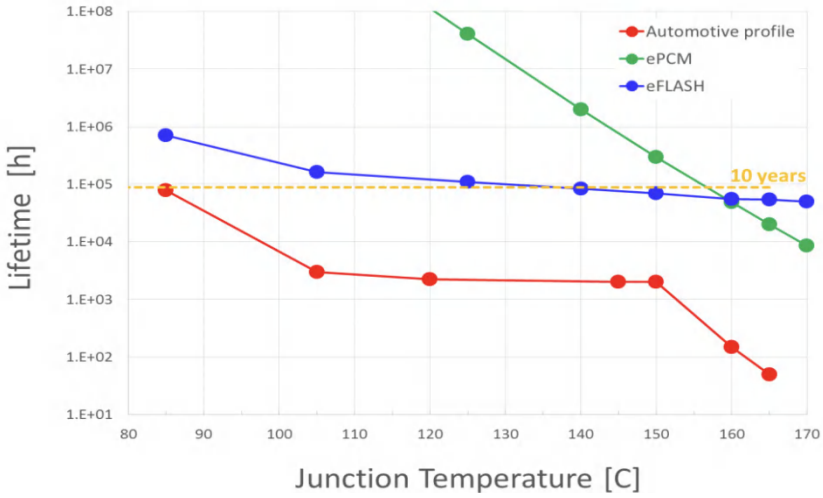


FIG. 23 PCM VS FLASH MEMORY LIFETIME IN TEMPERATURE

Prospettive / Impatto

Internet of Things (IoT) propone uno scenario dove sistemi elettronici intelligenti (ESS) hanno la capacità di stabilire connessioni tra loro per realizzare una rete di intelligenza distribuita.

La necessità di implementare lo scambio, l'elaborazione e la memorizzazione dei dati richiede la disponibilità di memorie non volatili embedded in grado di operare con potenze molto basse in lettura/scrittura (< 0.9mA), elevata velocità di programmazione (>900kB/s) ed estesa capacità di ciclatura (> 500 kc/word).

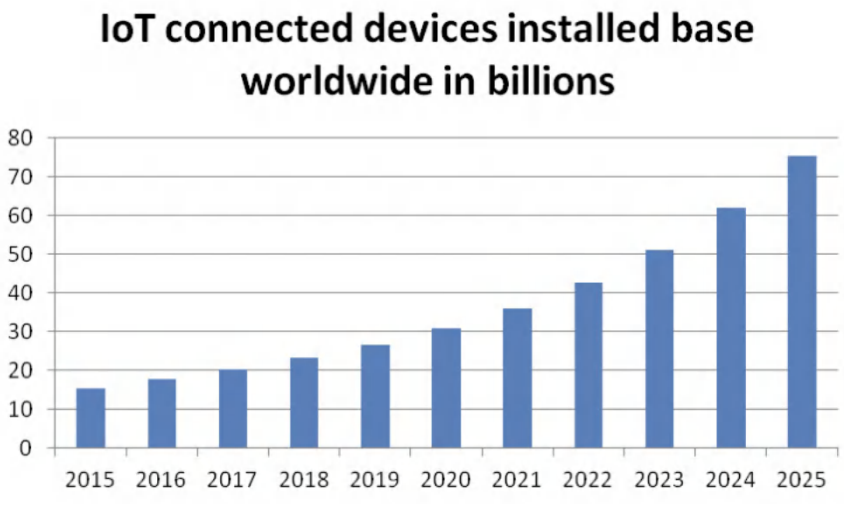


FIG. 24 PROIEZIONE AL 2025 DI DISPOSITIVI IOT INSTALLATI (SOURCE: STATISTA)

La dimensione del mercato globale IoT è raddoppiata nel triennio 2014-2017 e si stima che supererà i 2200 B$ entro il 2020, infatti il numero dei dispositivi interconnessi e` previsto avere una crescita continua almeno fino al 2025 (vedi fig. 24).
Un altro segmento promettente è rappresentato dalle applicazioni automotive. Il numero di sistemi basati su MCU all'interno dei moderni autoveicoli aumenta continuamente, seguendo la richiesta di sempre maggiore "intelligenza distribuita". Il mercato dei MCU per applicazioni automotive ha superato 5B$ nel 2017, con interessanti previsioni di crescita.
I MCU sono utilizzati non solo per la gestione del motore, del carburante, di airbag e controllo di stabilità ma anche per i futuri sistemi di guida autonoma, di elettrificazione del veicolo, per la telematica e la comunicazione veicolo-veicolo.
I requisiti di affidabilità per le applicazioni automotive più avanzate hanno raggiunto i 10ppb mentre il contenuto di memoria è aumentato fino a 4-16MB. Cicli termici fino a 165°C ed esposizione prolungata a T=150°C per 104-105 h sono condizioni tipiche per le applicazioni più impegnative.
Infine, una elevata velocità di programmazione (fino a 4MB/s) per ridurre il tempo di scrittura del codice e la possibilità di ciclare in maniera estesa la memoria dati (> 300kc) sono requisiti necessari.
L'attuale soluzione industriale PCM è in grado di rispondere parzialmente a questi requisiti. Quindi c'è spazio e forte motivazione per migliorare le prestazioni della memoria per la prossima generazione di dispositivi.
Le memorie basate su "floating gate" rappresentano ancora una soluzione profittevole, almeno per i nodi tecnologici più consolidati (> 40nm). Si prevede che l'industria dei semiconduttori utilizzerà questo dispositivi per il prossimo decennio.
Oltre il nodo dei 40nm la roadmap delle memorie non volatili embedded non è ancora definita. La sfida è rappresentata dalla esigenza di soddisfare un ampio spettro di applicazioni con soluzioni tecnologiche efficaci dal punto di vista dei costi di realizzazione.
In questa prospettiva la soluzione PCM è ben posizionata per raggiungere l'obiettivo, grazie alla possibilità di scalare la corrente di programmazione che abilita la riduzione dell'area della cella e alle prestazioni di ritenzione estrinseca dimostrate con lo sviluppo di calcogenuri ad elevato contenuto di Ge.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

5 milioni di euro, per 2 anni

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 3

TECNOLOGIE PER COMPONENTI OPTOELETTRONICI E FOTONICI

Le nuove aree di ricerca e sviluppo prioritarie riguardano:

- La realizzazione di circuiti ottici planari su più livelli ottici, con o senza Through Silicon Vias (TSV), in silicio, ossido di silicio ed ossinitruro di silicio su substrato di silicio
- L'accoppiamento ibrido tra componenti attivi III-V e circuiti ottici planari e relative tecnologie di packaging.
- L'integrazione 3D di componenti elettronici e componenti fotonici sul medesimo substrato.

Le tecnologie prioritarie sono relative alla costruzione di dispositivi fotonici per la rete ottica di nuova generazione, abilitante capacità trasmissive di decine di Terabit/s su singola board, come ad esempio:

- Guide con salto d'indice di rifrazione ottimizzato per l'applicazione.
- Multiplatori e demultiplatori ottici fissi e sintonizzabili.
- Accoppiatori ottici.
- Amplificatori ottici integrati in guida d'onda.
- Risonatori ad anello.
- Filtri fissi e sintonizzabili.
- Specchi.
- Adattatori di modo.
- Compensatori di dispersione.
- Controllori di polarizzazione.
- Circuiti di monitoring e tuning termico di dispositivi selettivi in lunghezza d'onda.

I dispositivi fotonici servono per la realizzazione dei nodi (Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer, OADM, Optical Cross Connect, ...) in grado di gestire flussi aggregati di circa 25 Tb/s su singola piastra e delle terminazioni ottiche per le reti di trasporto, distribuzione ed accesso e soprattutto per Data Center e i link a brevi distanze. Le principali tecnologie da sviluppare sono:

- Tecnologie di deposizione (CVD, Sputtering, forni per la crescita degli ossidi,....).
- Tecnologia di crescita di Ge su Silicio per fotodiodi o modulatori ad Elettro Assorbimento integrati
- Tecnologie di definizione delle geometrie (fotolitografia a 193 nm e a immersione) e di attacco (attacco wet e dry, ion beam ...).
- Tecnologie di micro posizionamento e di fissaggio automatiche.
- Post processing con polimeri e compatibilità di processo.

- Tecnologie di packaging.
- Tecnologia per l'automazione dei processi produttivi e dei metodi di test su fetta nella versione chip on wafer.

Di rilevanza generale sono le nanotecnologie necessarie per aggiungere nuove funzionalità, ridurre la potenza dissipata e aumentare la densità dei dispositivi per unità di area su fetta (per esempio modulatori in cavità integrati).
Di grande interesse la possibilità di aumentare la densità dei componenti fotonici integrabili su singolo dispositivo per la riduzione della complessità degli accoppiamenti esterni ed il contenimento dei costi. A tal fine gli sviluppi delle guide ad alto salto di indice di rifrazione e degli adattatori di modo sono di rilevanza primaria. La maggiore densità di funzionalità e componenti integrati su singolo substrato rende particolarmente critico il package e l'accoppiamento con le fibre ottiche, che hanno una struttura guidante a basso salto di indice di rifrazione. Tecniche nuove di packaging a basso profilo si renderanno necessarie per aumentare la densità di moduli Tx/Rx su piastra, oltre alla ricerca di nuovi substrati ceramici, termicamente conduttivi, che permettano di migliorare prestazioni dei componenti, come il flusso luminoso dei diodi LED.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

È indubbio che la componentistica optoelettronica sia ormai una delle più strategiche per le applicazioni in diversi settori commerciali, di cui i più importanti sono quello dei displays, information & communication technology, fotovoltaico, tecnologie mediche & scienza della vita, misure & visione automatica, illuminazione, e tecnologie di produzione, un mercato che globalmente passa dai 530.52 miliardi di USD in 2017 ai 795.54 miliardi di USD nel 2022, con un CAGR dell'8.4%.
All'interno di questa generale tendenza di crescita restano ampie possibilità di sviluppo nell'area metropolitana, dell'accesso e della rete in generale, dove ancora poco è stato sfruttato il fatto che le tecnologie fotoniche integrate su silicio consentono di integrare molte funzionalità elettroniche che consentono la programmabilità remota della rete. In questo ambito è necessario uno sforzo non indifferente di sviluppo tecnologico finalizzato a componenti ottici producibili in grandi volumi e a costi ridotti in grado di competere in termini di rapporto prestazioni/costi con le soluzioni attuali. Un vantaggio cruciale offerto dalle nuove tecnologie di integrazione per ridurre i costi della gestione di rete potrà essere ottenuto aumentando "l'intelligenza" a bordo del componente, le cui prestazioni potranno quindi essere controllate da remoto, riducendo la complessità di gestione della rete.
Lo sforzo per lo sviluppo della componentistica in tutti questi settori, associato ad una generale riduzione dei costi consentita dalle tecnologie qui proposte, consentirà di accelerare l'attuale fase di recupero del mercato e di instaurare una fase di espansione in linea con la tendenza del mercato globale.
Le motivazioni per lo sviluppo di queste tecnologie possono sintetizzarsi nell'opportunità di investire in un settore con un buon tasso di crescita del mercato mondiale, con particolare attenzione agli aspetti legati al packaging dei dispositivi, settore ancora del tutto immaturo a livello mondiale, dove sono considerevoli le possibilità di ritorno economico anche per l'industria italiana.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Da una parte il quadro delle aziende italiane operanti nelle aree della componentistica ottica si è andato riducendo in questi ultimissimi anni per decisioni strategiche prese all'estero, dall'altra qualche nostra grande industria si configura come leader mondiale sulla via della integrazione a livello industriale tra mondo elettronico e fotonico seppur continuano ad essere particolarmente attivi grandi aziende (in particolare TSMC) in forte competizione con noi.

A fronte di una congiuntura internazionale sfavorevole verso le nostre aziende continuano ad esistere positivi segni di reazione in qualche regione italiana che vanno ampiamente supportati. Esiste una consolidata esperienza di livello internazionale nello sviluppo di circuiti ottici integrati su silicio e recentemente le competenze recuperate dall'estero sulla fotonica integrata si sono coagulate intorno alla realizzazione di una nuova struttura tecnologica focalizzata sulle lavorazioni di substrati di silicio per applicazioni fotoniche, tecnologie ottiche e di packaging.

Il processo di packaging, in particolare, è ancor oggi oggetto di accurato studio ed esistono nel paese competenze d'avanguardia per la realizzazione di dispositivi ottici realizzabili attraverso tecniche automatiche adatte alla produzione di massa. Le esperienze citate rappresentano un requisito indispensabile per affrontare con successo lo sviluppo della componentistica necessaria per Data Center, per la rete 5G e per l'accesso diffuso alle reti a larga banda.

Lo stato dell'arte mondiale e nazionale in questo settore, e soprattutto nel packaging, continua ad essere inadeguato a soddisfare le esigenze applicative. L'industria nazionale, ha quindi ancora una grande opportunità per imporsi a livello mondiale sfruttando le capacità di innovazione, l'efficienza manifatturiera e la solida base tecnologica di partenza della quale può disporre.

Lo sviluppo di link a breve distanza a basso consumo e di ridotte dimensioni progredirà per gradi con obiettivi di medio e di lungo periodo. Le piattaforme tecnologiche in via di sviluppo consentiranno, se adeguatamente finanziate, di cogliere sia la finestra temporale sia di innovare il mercato con soluzioni all'avanguardia di livello mondiale se si decide di investire decisamente in questo settore. Ciò contribuirà a trattenere a livello nazionale una rilevante parte della catena del valore consentendo di procedere in prima linea verso sempre nuovi traguardi in grado di favorire l'occupazione e le produzioni nazionali.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

60 milioni di euro (in 3 anni).

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 4

TECNOLOGIE PER COMPONENTI FOTONICI BASATI SU TECNOLOGIE QUANTISTICHE

Da qualche anno la Comunità Europea ha iniziato ad investire ingenti risorse nello sviluppo di dispositivi, sistemi e reti di comunicazioni basati su Tecnologie Quantistiche. Nel 2017 è stata avviata una nuova Flagship specifica per applicazioni di Q. Computing, Q. Simulation, Q. Communications, Q. Sensor and Metrology e sulla Basic Science, trasversale alle quattro aree applicative. L'Italia considera il Q. Computing e le Q. Simulation appannaggio degli USA per due ragioni fondamentali: in USA ci sono gia' grandi gruppi privati che hanno investito cifre rilevanti sia in USA sia in Europa e non solo, e per il fatto che in Europa non ci sono produttori industriali in questi settori applicativi, che possano mettere a frutto l risultati delle ricerche in termini di ricchezza prodotta e di occupazione lavorativa.

Quanto alle Q. Communications la competizione con la Cina sara' un punto cruciale irrinunciabile data la strategicita` delle infrastrutture di rete e della loro sicurezza. Le aree della sensoristica e della metrologia sono ad oggi invece relativamente poco presidiate dalla competizione internazionale, mentre sono le piu' adatte alle caratteristiche tipiche della ricerca e della industria europea anche di piccole e medie dimensioni. Per le suddette ragioni sembra quindi prioritario investire in questa direzione, pur dovendo presidiare necessariamente le comunicazioni e la sicurezza delle nostre reti.

Le nuove aree di R&D e le relative tecnologie abilitanti e prioritarie sono tese alla costruzione di dispositivi fotonici sia per la rete in fibra ottica (per telecomunicazioni, in data center) sia per comunicazioni in spazio libero, che vanno da collegamenti di pochi cm fino ad oltre 50.000 Km (per esempio: i pagamenti con carta di credito, collegamenti tra cellulari, tra auto, tra auto e infrastruttura, avionica, satellitare...) e riguardano:

- Sviluppo di sorgenti a singolo o multi fotoni e circuiti ottici di elaborazione e controllo degli stessi realizzate con tecnologia Si Photonics in silicio, o planare con ossido di silicio ed ossinitruro di silicio su substrato di silicio
- Sviluppo di rivelatori a singolo fotone in Silicio o di Germanio su Silicio
- L'accoppiamento ibrido tra componenti attivi III-V, elettronica di pilotaggio e controllo integrato e circuiti ottici planari e relative tecnologie di packaging.
- L'integrazione 3D di componenti elettronici e componenti fotonici.
- Tecnologie di Packaging per sensori quantistici opto-meccanici ad elevate prestazioni

I principali dispositivi da sviluppare sono:

- Generatori di numeri casuali ti tipo quantistico
- Circuiti ottici planari per la riproduzione di una varietà di configurazioni quantistiche

- Fotodiodi SPAD al Ge o Si ad alta efficienza
- Sorgenti ottiche (a singolo/multi fotone, entangled o squized) nel visibile o NIR
- Sensori quantistici ottici, meccanici, magnetici, RF
- Packages trasparenti a tenuta di vuoto
- Controllori di fase o di polarizzazione
- Modulatori in Si o Ge ad Elettroassorbimento
- Filtri ottici di Bragg integrati
- Circuiti integrati di controllo della fase e monitoring della potenza

I dispositivi fotonici servono per la realizzazione di circuiti ottici in gradi di riprodurre una grande varietà di esperimenti quantistici utilizzabili in tutte le aree applicative di interesse. Il QRNG è il componente base per la sicurezza delle reti di trasmissione ottica. Si dovrà distinguere per compattezza, basso costo e soprattutto per un random bit generation superiore al Gb/s. I componenti ottici discreti o integrati in quantum senders/receivers per comunicazioni in spazio libero abilitano invece comunicazioni sicure, dal metro alle decine di migliaia di Km, soprattutto nella regione di trasmissione tra 800 e 900 nm.
Diverse sono le principali tecnologie da sviluppare e complesse sono le relazioni con I dispositivi da sviluppare in termini di rischi e di livello di integrabilità. Il quadro generale delle possibilità di sviluppo è riportato nelle due figure che seguono sia per le sorgenti sia per I rivelatori, rispettivamente, tutti operanti a temperatura ambiente o superiore.

La fig. 25 mostra una sintesi delle possibilità in campo per le sorgenti di fotoni a 810 e a 1550 nm. I microring producono fotoni entangled e richiedono una pompa ottica, altre sorgenti producono deboli sorgenti di fotoni. A destra è mostrato il livello di integrabilità sia per sorgenti a singolo (debole) fotone sia per fotoni entangled.

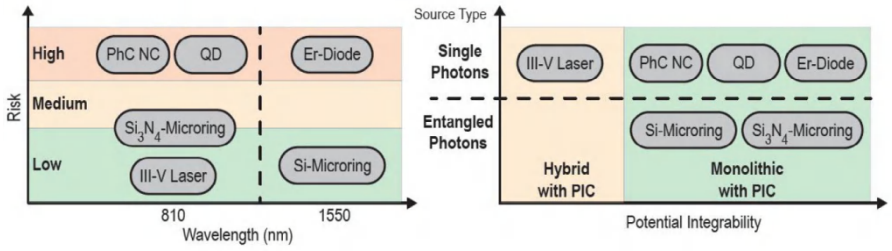


FIG. 25 SINTESI DELLE TECNOLOGIE PRIORITARIE PER LO SVILUPPO DI SORGENTI OTTICHE PER COMUNICAZIONI QUANTISTICHE

In fig. 26 mostriamo analogamente lo stato delle tecnologie prioritarie per lo sviluppo dei rivelatori a temperature ambiente. Sono mostrate in particolare le relazioni tra il rischio e il livello di integrazione delle tecnologie per lo sviluppo di rivelatori a 1550nm.

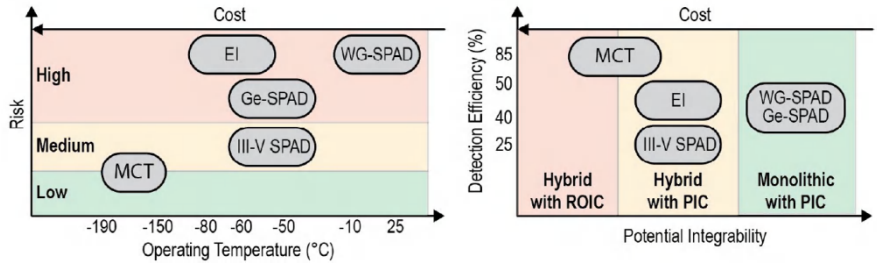


FIG. 26 STATO DELLE TECNOLOGIE PRIORITARIE PER LO SVILUPPO DEI RIVELATORI A 1550 NM OPERANTI A TEMPERATURA AMBIENTE

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Una delle prime urgenze che motivano quanto proposto è la sicurezza delle nostre reti di comunicazioni, aspetto comune a tutte le aree applicative indicate in precedenza, dalle brevissime distanze a quelle ultra lunghe tra satelliti. Con l'avanzare dei computer sempre più performanti, e infine dei computer quantistici, nessun algoritmo di sicurezza attualmente in uso sara' più efficace baluardo contro gli hackers. Tutti gli algoritmi oggi in sviluppo per la criptazione dei dati, volti ad assicurare un tempo di calcolo fuori dalla portata dei computer disponibili al momento, potranno essere decodificati in tempi sempre più brevi grazie alle crescenti capacità di calcolo dei nuovi computer in sviluppo fino a raggiungere tempi brevissimi quando saranno disponibili i computer quantistici, che pur sono una delle aree prioritarie di sviluppo della nuova Flagship in Europa e nel mondo, come riportato sopra. A quel punto, l'unica barriera che potrà garantire ancora la sicurezza dei nostri dati e delle comunicazioni di qualsiasi tipo è basata sull'uso dei fenomeni quantistici nelle tecniche di trasmissione realizzati e controllati con tecnologie già mature (su Silicio) e su altre ancora da mettere a punto, vedi fig. 25 e 26 relativamente alla componentistica di base. Ovviamente a tutti questi sviluppi vanno associati quelli relativi ai protocolli di trasmissione e delle architetture di rete e della distribuzione delle chiavi quantistiche di sicurezza (QKD) a cui si rimanda nel capitolo dedicato. Quindi il primo fondamentale motivo è di tipo strategico. Vi è poi un motivo economico ad esso associato. La enorme dimensione economica dei vari settori applicativi, indicati sopra, tutti a doppia o tripla cifra in miliardi di euro, giustificano gli ingenti investimenti messi in campo dalla Comunità Europea, (che come primo passo ha investito 1 miliardo di euro per la ricerca nei prossimi 10 anni, ma a questo ne stanno seguendo altri, i cui strumenti di gestione sono già in corso di messa a punto) e dai singoli stati (la Germania, per esempio, da sola investirà 600 milioni di euro). Vi è poi una motivazione di sana competizione nei vari settori di mercato. Già oggi sono state realizzate diverse sperimentazioni in campo che mostrano come già oggi si possono realizzare le prime generazioni di sistemi di comunicazione, la cui sicurezza è basata su tecnologie quantistiche e su tecniche innovative per la gestione delle reti. Per esempio, se consideriamo solo il secondo trimestre del 2018, ADVA ha realizzato un collegamento a 100 Gb/s quantisticamente sicuro su una distanza di 2.800 Km tra Poznan , in Polonia e Trondheim, in Norvegia. In Spagna, nell'area di Madrid, Telefonica, insieme a Huawei, UK Quantum Communications Hub, e con apparati di Toshiba e ADVA, ha realizzato una rete metropolitana con sicurezza quantistica. Un'altra rete metropolitana è stata realizzata nell'area di Cambridge, in UK,

tra gli istituti di tre centri di ricerca pubblici inglesi e privati (Toshiba). In questo caso la rete è stata messa a punto dai partners del consorzio Quantum Communications Hub, composto da otto università inglesi, con gli apparati QKD sono stati forniti da Toshiba Research Europe Limited (TREL), United Kingdom, mentre ADVA ha fornito gli apparati di trasmissione ottica.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Seppur in Italia ci sia un diffuso K-H specifico in questo campo a livello universitario e del CNR, poche sono le aziende che già operano nel settore delle tecnologie quantistiche, tranne qualche eccezione, come MPD, una start up con sede a Bolzano, che produce un QRNG compatto e con prestazioni di random bit generation fino ai 200 Mb/s.

In Europa, le sole sperimentazioni citate sopra dicono di una frenetica attività non solo di ricerca ma anche di allestimento di reti in campo e di realizzazione di apparati pronti per il mercato. Prime fra tutti le aziende tedesche (ADVA) e anglo-giapponesi (TREL).

In USA la ricerca accademica è concentrata ad Harvard, MIT, CalTech, Yale, University of Maryland e University of California Santa Barbara che agisce a diretto supporto dei due grandi gruppi privati che hanno investito nelle tecnologie quantistiche: Microsoft and Google. IBM è invece il principale partner del governo Americano che investe 250 milioni di dollari all'anno principalmente per applicazioni militari. Intel invece si è creata una sua rete di centri di ricerca: Princeton University, il QuTech presso la Delft University of Technology in Olanda e la University of New South Wales (UNSW) a Sydney, Australia. Solo nel QuTech sta investendo 50 milioni di dollari all'anno dal 2015 e per 10 anni. Ma recentemente anche il governo Americano sta pianificando un finanziamento per la ricerca analogo a quanto ha fatto l'Europa. Solo la Cina ha un programma di ricerca, analogo a quello europeo, finalizzato alle sole quantum communications dove investe 1.4 miliardi di euro per tre anni. La ricerca è svolta principalmente presso il campus della University of Science and Technology in Shanghai e Hefei. Oltre alle attività di ricerca, ad Hefei c'è la sede della QuantumCTeck, il maggior provider globale di prodotti e servizi per la sicurezza di reti multi-protocollo. Fondata come start-up nel 2009, oggi la compagnia conta più di 500 persone. Le banche cinesi usano già collegamenti con sicurezza quantistica su collegamenti di oltre 2000 Km.

Il Giappone non ha un particolare programma di ricerca centralizzato. Lascia che le istituzioni accademiche quali The Atsugi Lab del Nippon Telegraph e la Telephone Corporation svolgano autonomamente le loro ricerche nel campo. In Italia la STMicroelectronics ha disponibili tecnologie con maturità industriale e già in mass production come la Silicon Photonics (che abilita la realizzazione di circuiti fotonici anche di tipo quantistico) o il CMOS per sensori ottici classici o anche a singolo fotone (SPAD array) che abilitano lo sviluppo dei QRNG insieme alle tecnologie di packaging per MEMS. Occorre però che si crei un ecosistema, tra mondo accademico, centri di ricerca, start up e industria italiana, in grado di affrontare tutta la complessità dello scenario tecnologico illustrato sopra.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

120 milioni di euro (in 3 anni).

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 5

SISTEMI E PROTOCOLLI PER LA TRASMISSIONE DELL'INFORMAZIONE QUANTISTICA

Protocolli per la distribuzione della chiave quantistica

Come descritto nel precedente capitolo, l'ambito delle tecnologie quantistiche, a partire dalla comunicazione, computazione e simulazione, influenzeranno drasticamente la società nel medio e lungo termine.

Nella precedente sezione è stata analizzata come tecnologia prioritaria, quella delle componenti fotoniche integrate, che risulteranno essenziali per lo sviluppo e diffusione dei sistemi quantistici in genere.

Ad ogni modo, esse di per sé non sono sufficienti a mettere in atto tale rivoluzione, in quanto risulta tanto complesso sviluppare la componentistica, tanto quanto determinare e studiare protocolli e sistemi che riescano a sfruttarne a pieno le capacità, garantendo una sicurezza, un'efficienza ed un costo accettabili.

Per distribuzione della chiave quantistica, si intende un sistema in cui due (o più) partner utilizzano un canale quantistico per trasmettere una chiave segreta che viene condivisa tra i partner e che quindi viene utilizzata per cifrare un canale classico sul quale viene inviata l'informazione.

La crittografia quantistica, a differenza della classica, gode di un incondizionato livello di sicurezza; con questo si intende che la sicurezza non è dipendente dalle capacità dell'intruso, cioè di colui che desidera avere accesso non autorizzato ai dati, bensì tale sicurezza è garantita dalle leggi fisiche della meccanica quantistica.

Questo risulta essere un approccio decisamente diverso rispetto ai normali sistemi crittografici, la cui sicurezza proviene dall'assunto che nessuno riuscirà a risolvere alcuni specifici problemi matematici considerati complessi, quali la fattorizzazione dei numeri.

Tali problemi infatti non hanno una dimostrazione associata secondo cui essi sono insolubili, ed anzi, è stato dimostrato recentemente come alcuni algoritmi quantistici possano riuscire a risolverli efficientemente.

In particolare, per capire come la meccanica quantistica possa garantire questo livello di sicurezza, basta interpretare le interazioni tra l'intruso ed il canale atte ad ottenere informazioni come fossero delle generiche misure del canale; infatti, dai principi fondamentali della meccanica quantistica, è noto che ogni tipo di misura dello stato quantistico, lo influenza, permettendo a colui che riceve l'informazione di identificare la misura fatta e quindi l'intrusione.

Inoltre, i principi fisici sui cui si fonda, garantiscono che ogni stato quantistico ignoto non possa in alcun modo essere clonato mantenendo intatto l'originale, garantendoci quindi l'integrità della chiave ricevuta.

Svariate dimostrazioni ed implementazioni di quantum key distribution (QKD) sono state pubblicate a partire dal 1984, anno in cui il primo protocollo fu inventato, il quale prevedeva l'uso della

polarizzazione della luce come stato quantistico nel quale far fluire l'informazione.
Sono state proposte quindi molteplici varianti implementative in cui lo stato quantistico risiedeva nella fase, spin o momento del fotone trasmesso, ognuna delle quali con i propri vantaggi e svantaggi dipendenti dal contesto di applicazione.
Ad ogni modo, in tutti questi sistemi, l'assunzione di sicurezza incondizionata risulta valida soltanto per sistemi ideali, che non prevedono imperfezioni del canale e per cui i dispositivi lavorano idealmente.
Queste assunzioni sono di difficile giustificazione in implementazioni realistiche, soprattutto se si parla di reti complesse con un elevato numero di nodi ed effetti fisici di cui tener conto, in cui l'informazione può trapelare in canali non considerati nel trattamento teoretico e soprattutto con dispositivi subottimali. Negli anni a seguire sono quindi emersi di pari passo dimostrazioni relative a vulnerabilità nei sistemi e protocolli già proposti, insieme a nuove soluzioni atte a risolvere le vulnerabilità emerse.
Ad esempio, è stato dimostrato come molti dispositivi per la ricezione ed emissione di singoli fotoni, siano vulnerabili ad attacchi dipendenti dalla natura del dispositivo, in cui l'intruso riesce, con tecniche variegate, a controllare remotamente tali dispositivi e quindi ad estrapolarvi informazioni rilevanti, senza violare leggi della meccanica quantistica.
Al fine di trovare una soluzione per questa classe di attacchi, è stata individuata una famiglia di protocolli "device-independent" (DI) QKD, cosi chiamati in conseguenza del loro funzionamento non dipendente dalle misure o dalla preparazione degli stati quantistici nei dispositivi dei partner di riferimento.

In questo modo anche nel caso in cui un intruso avesse effettivamente la possibilità di manipolare i dispositivi atti alla generazione e ricezione dei fotoni, la trasmissione risulterebbe comunque sicura.
Un altro esempio di vulnerabilità emersa, deriva dalla sub-ottimalità delle sorgenti utilizzate, infatti le sorgenti a singolo fotone richieste, sono raramente utilizzabili, in quanto risultano molto costose e richiedono di essere operate a temperature criogeniche. Un'interessante alternativa molto diffusa è quella di utilizzare un normale laser, che viene poi attenuato fino ad ottenere un numero limitatissimo di fotoni (2-3) per impulso, ma senza garanzia sul numero effettivo di fotoni trasmessi.
In tali casi è stata dimostrata la possibilità di prelevare alcuni dei fotoni con molteplicità maggiore di uno, lasciando fluire trasparentemente gli altri, e di estrapolare informazioni della copia ottenuta al fine di ottenere informazioni parziali sulla chiave trasmessa.
Di conseguenza sono sorti i protocolli basati su "decoy states" in cui l'ampiezza del flusso luminoso viene controllato e monitorato al fine di rilevare l'evento dell'intruso che ne sta prelevando una parte.
In parallelo stanno inoltre sorgendo le estensioni dei protocolli multi-party, per abilitare lo scambio multicast della chiave quantistica e non solo quella p2p, nei cui casi le verifiche formali di sicurezza si complicano ulteriormente, aprendo le porte a nuove classi di possibili vulnerabilità.
Questo per dire che numerosi protocolli stanno emergendo nell'ambito, che la comunità sta convergendo lentamente ad un insieme di protocolli stabili e sicuri, pronti per la distribuzione su larga

scala, ma che allo stesso tempo ancora molto lavoro è necessario per riuscire a garantire teoricamente tali livelli di sicurezza per ogni tipo di scenario realistico.
In aggiunta, un ulteriore problematica, è che incrementando la complessità dei protocolli, anche la garanzia delle prestazioni in termini di distanza e rate ottenuta, risulta crescentemente più complesso.

Sistemi per la distribuzione della chiave quantistica

L'ambito della distribuzione della chiave quantistica risulta ad oggi un ambito in cui vi è un'elevata disparita tra le modalità di verifica ed implementazione di laboratorio, perlopiù effettuata su topologie p2p, rispetto all'insieme dei possibili e variegati scenari.
Data la genericità e l'eterogeneità delle comunicazioni che è possibile rendere sicure con questa tecnologia, che spaziano dalle comunicazioni satellitari in aria, alle comunicazioni metropolitane in fibra, alle comunicazioni a corto raggio per i pagamenti contact-less, sarà necessario uno studio approfondito per risolvere i problemi specifici di ognuna di queste categorie di sistemi estremamente diversi.
Nell'ambito dei sistemi che richiedono di lavorare su lunghe distanze, una prima limitazione sta nell'efficiente riutilizzo del canale per i dati classici e quelli quantistici; risulta infatti impensabile l'installazione di canali ad-hoc per la trasmissione della chiave quantistica, dati gli elevatissimi costi di installazione (immaginiamo ad esempio il sistema cablato transoceanico).
Per far questo diversi studi sono in corso d'opera per capire come multiplare in tempo o frequenza i canali classici con quelli quantistici senza disperdere la delicatissima chiave trasmessa su singoli fotoni.
Oltre questo, la principale restrizione che limita lo sviluppo su larga scala di questo tipo di sistemi, è l'incremento esponenziale delle perdite in trasmissione nella propagazione dei fotoni, che limita conseguentemente il rate a cui la chiave viene scambiata a valori inaccettabilmente bassi.
Per fortuna prestazioni accettabili sono ottenibili per le distanze tipiche delle reti metropolitane, che risultano al limite di fattibilità per le tecnologie quantistiche già implementabili.
Nei contesti in cui invece la distanza è maggiore, tecniche aggiuntive devono essere elaborate e testate. La soluzione a lungo termine al problema è quella di adottare i ripetitori quantistici, che risultano particolarmente complessi da implementare a causa dei principi stessi di non clonabilità della meccanica quantistica.
Alcune implementazioni sono in fase di ricerca, ma molte problematiche persistono e probabilmente non saranno disponibili per installazioni realistiche nel prossimo futuro.
Un'alternativa ai ripetitori, è quella di utilizzare stazioni considerati "affidabili" inserite nella rete tra la sorgente ed il destinatario. Queste stazioni avranno il compito di ricevere e ritrasmettere la chiave quantistica, incrementando illimitatamente la distanza complessiva che diviene proporzionale al numero di stazioni affidabili installate.
Ovviamente in questo modo perdiamo la garanzia di sicurezza end-to-end e dobbiamo affidarci all'assunzione che i nodi inseriti sia effettivamente sicuri, la sicurezza è garantita esclusivamente sui singoli segmenti p2p.
Una possibile implementazione di tale concetto è quella di utilizzare come stazioni affidabili dei

satelliti in orbita, incrementando la loro affidabilità rendendo complesso l'accesso fisico a tali dispositivi e quindi aumentandone la complessità di attacco; inoltre l'attenuazione della luce in aria è strettamente inferiore a quella in fibra, rendendo possibile creare una rete di satelliti molto distanti, che comunicano soltanto alla fine, tramite un link diretto, con le stazioni sorgente o ricevente a terra.

Ad oggi questo approccio risulta essere tra i migliori candidati per la propagazione su base terrestre di comunicazioni quantistiche.

Un'altra tipologia di sistemi quantistici rilevante è quella delle applicazioni free-space a corto raggio, come i trasferimenti cellulari per effettuare pagamenti o l'identificazione personale.

In questo contesto si ha uno scambio di dati sensibili in aria e spesso in luoghi affollati, rendendo il rischio di attacco molto elevata.

Questa tipologia di sistemi, richiede di essere economica, stabile, leggera ma soprattutto deve avere un'elevata capacità di puntamento ottico per mantenere attiva la connessione tra sorgente e destinatario mentre uno dei due è in movimento.

Per risolvere, un rapido orientamento del fascio ottico deve essere implementato e l'utilizzo di dispositivi quantistici integrati ed a basso costo diviene essenziale.

In questa tipologia di scenari possiamo immaginarci un'infinità di applicazioni, come ad esempio le comunicazioni tra veicoli di ogni sorta, dispositivi personali per l'apertura sicura dei propri mezzi od il controllo di apparecchiature, interconnessione di device intelligenti in casa o in città.

Ovviamente in tutti questi settori i parametri essenziali divengono l'integrabilità, miniaturizzazione e costo di implementazione, che devono essere minimizzati.

Veramente limitati ad oggi continuano ad essere i lavori di ricerca o di implementazione in questo settore specifico nonostante siano di massima importanza per garantire una sicurezza appropriata in un mondo in cui le nostre informazioni personale divengono sempre più esposte e vulnerabili.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Negli ultimi 20 anni, un numero sempre maggiore di aziende private e statali hanno iniziato indipendentemente a sviluppare tecnologie per sistemi quantistici.

Il progresso ottenuto da tali iniziative ha prodotto una moltitudine di esperimenti rilevanti ed anche alcuni dispositivi e sistemi commerciali dalle limitate capacità, (Mbps) se paragonati al tipo traffico trasportato su infrastrutture ottiche (Tbps). Per far sì che tali tecnologie riescano ad ottenere effettivamente l'impatto che meritano, le infrastrutture per le comunicazioni quantistiche richiedono una pervasiva diffusione.

Dalla precedente analisi delle caratteristiche, emerge come, nonostante la tecnologia riguardo la distribuzione della chiave quantistica sia una formidabile tecnica abilitante, essa non sia ancora riuscita ad approcciarsi al mondo industriale su larga scala. I suoi stakeholder ancora non la percepiscono come un'alternativa competitiva ai moderni sistemi di sicurezza classici, a causa delle numerose attuali limitazioni. Probabilmente per alterare questa percezione, non sarà sufficiente soltanto migliorare i principali parametri caratterizzanti quali velocità di trasmissione, distanza e costo. Per avere un impatto effettivo e tangibile sul lungo termine, i sistemi quantistici

dovranno essere effettivamente in grado di dare una risposta ad un problema che non sarebbe risolvibile altrimenti. Le garanzie di sicurezza relative a questi sistemi dovranno quindi essere ampliate e dettagliate per sistemi realistici, e non soltanto per sistemi ideali.
Un secondo motivo che sta impendendo la diffusione su larga scala di questa tecnologia, sta nella necessità di potenziare la trasparenza nell'uso di tali sistemi nelle moderne infrastrutture ottiche, determinando dispositivi basati su di un singolo standard tecnologico, e riutilizzando le infrastrutture già esistenti per il trasporto dell'informazione classica, creando sistemi capaci di far coesistere efficientemente i due. La risoluzione di tutte le problematiche descritte risulta essere molto complessa e sfidante, ma tanto è già stato fatto ed una volta che verranno completati anche questi ultimi passi, si apriranno le porte ad un nuovo livello di sicurezza nel mondo delle telecomunicazioni; verrà a formarsi una società in cui nessuno, a prescindere dalle proprie risorse e dalla potenza di calcolo a sua disposizione, potrà immaginarsi di riuscire ad ottenere quelle informazioni che sono state correttamente criptate secondo queste nuove tecniche.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

L'ambito dei sistemi e dei protocolli per le comunicazioni quantistiche nasce nel 1984 con il primo protocollo implementabile denominato BB84 di Bennett e Brassard, usato per distribuire la chiave segreta usando gli stati di polarizzazione dei singoli fotoni trasmessi, ed usando il canale classico per analizzare statisticamente i risultati delle misure effettuate, determinando le intrusioni avvenute. In questi anni un crescente interesse ha mosso la ricerca nell'ambito, facendo emergere un elevato numero di protocolli e schemi per la distribuzione della chiave quantistica, tecnologia che oggi viene considerata essere chiave per la nostra società.
La distribuzione delle risorse sul suolo Italiano è molto simile a quella già descritta nella precedente sezione sulle componenti quantistiche: in Italia abbiamo un'elevata concentrazione di ricerca nell'ambito delle tecnologie quantistiche a livello universitario e del CNR, ma nonostante questo le aziende operanti nel settore sono pressoché inesistenti.
A livello Europeo risultiamo essere ancora una volta tra i leader nel settore di ricerca, secondo McKinsey, più del 50% degli articoli pubblicati nell'ambito delle tecnologie quantistiche provengono da università europee.
A partire dal 2018, l'Europa ha deciso di investire mediante un programma di finanziamento in 10 anni, 1 miliardo di euro esclusivamente dedicato all'ambito delle tecnologie quantistiche, ed un'intensa attività di sviluppo industriale in questo settore è altamente probabile.
Nel 2004 a Vienna è stato effettuato con successo il primo trasferimento bancario utilizzando la distribuzione della chiave quantistica finanziato dall'Unione Europea.
Nel resto del globo un grande fermento è in atto: In America la ricerca si concentra in Harvard, MIT, CalTech, Yale, mentre a livello industriale, grandi investimenti arrivano da Google, Microsoft, IBM, NASA. Nonostante questo al momento non vi sono piani di investimento specifici paragonabili a quelli europei, anche se sono in fase di pianificazione. In Cina già esistono collegamenti bancari criptati con chiave quantistica che superano i 2000km ed è stato già attivato un programma di ricerca in cui investe 1.4 miliardi di euro in 3 anni.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 6

OPPORTUNITÀ NELLE RETI DI TELECOMUNICAZIONE CON L'AVVENTO DEL GRAFENE

Le reti di telecomunicazione hanno avuto nell'ultimo decennio un notevole sviluppo tecnologico per poter sostenere una forte crescita del traffico dati, che è destinato ad aumentare in modo significativo anche nei prossimi anni. Secondo il Mobility Report 2018 di Ericsson, si passerà dagli attuali 95 exa-bytes al mese ad un totale di traffico dati stimato di 357 exa-bytes al mese per il 2023. Il traffico mobile è stimato avere una crescita più pronunciata rispetto a quello della rete fissa nei prossimi 5 anni. Il tipo di traffico mobile preponderante sarà maggiormente quello video (e.g. video sharing, social network video service, augmented reality, telepresence, massive IoT), per circa il 73%.

Per sostenere questa esplosione di traffico dati bisogna superare gli attuali limiti tecnologici basati sull'uso della tecnologia di silicio. Il silicio è il materiale fondamentale nel settore dei semiconduttori che ha storicamente mantenuto il passo con la legge di Moore fornendo progressi sostanziali fino ad oggi ma che inizia a sperimentare nuovi limiti di sviluppo tecnologico.

Per rafforzare l'innovazione tecnologica si presenta la necessità di introdurre nuovi processi di produzione ma anche nuovi materiali in grado di proporre nuovi modelli evolutivi più sostenibili sia dal punto di vista dei costi che della efficienza energetica. Il grafene nello scenario attuale di sviluppo industriale rappresenta un materiale in grado di abilitare nuovi modelli di sviluppo che richiedono investimenti sostanziali nel prossimo decennio per poter arrivare ad un livello adeguato di maturità tecnologica.

MOTIVAZIONE PER LO SVILUPPO

Tra le tecnologie più innovative che possono abilitare soluzioni di rete avanzate, la fotonica su silicio (i.e. Silicon Photonics) è quella più promettente ed è in grado di provvedere ad un livello di integrazione in un unico circuito e su larga scala di numerose funzioni di processamento e trasmissione dati (e.g. più di mille funzioni integrabili in meno di una decina di millimetri quadri per segnali a larga banda), aspetto fondamentale per poter ottimizzare i costi e l'efficienza energetica di un apparato di telecomunicazioni.

A coadiuvare la fotonica sul silicio negli aspetti di integrazione sempre più spinta per dimensioni compatibili con le più promettenti nanotecnologie per le telecomunicazioni, il grafene come materiale bidimensionale presenta un potenziale evidente in termini di efficienza energetica e ridotto impatto in termini di occupazione spaziale. Un vantaggio notevole è il loro spessore di un solo atomo o di una molecola, che fornisce nuove possibilità di integrazione tecnologiche di numerose funzionalità operative in circuiti elettronici e fotonici sempre più compatti e leggeri rispetto a quelle ottenibili con il solo silicio.

Date queste sfide, è naturale prevedere che il grafene verrà adottato come potenziatore delle tec-

nologie esistenti come quella basata sul silicio, solo in un secondo momento e molto in avanti nel tempo saprà entrare a pieno titolo nello sviluppo di nuove soluzioni tecnologiche abilitanti.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Nella fase imminente di miglioramento della tecnologia esistente, in ambito reti di telecomunicazione, il grafene può fornire avanzamenti incrementali delle prestazioni dei dispositivi realizzati con tecnologia sul silicio per la trasmissione e commutazione di rete, quali l'incremento della velocità di interconnessione, di commutazione e di processamento dati grazie alle sue proprietà di base. Si può fare riferimento ad una capacità di conduzione termica molto elevata, tanto da rendere stabili le condizioni di funzionamento e le prestazioni di sistema ad elevata capacità di interconnessione senza dover ricorrere a tecniche di dissipazione e controllo termico. Non meno importante è l'elevata conducibilità elettrica per la generazione e rivelazione di flussi di dati sempre più grandi (e.g. singolo canale trasmesso a 100- 400 Gigabit/secondo su circuiti ad alta frequenza).

Si definisce così la ricerca e lo sviluppo della fotonica in grafene, "Graphene Photonics", atta a migliorare le attuali prestazioni dei dispositivi in fotonica integrata basata essenzialmente sul silicio e sull'uso di materiali III-V (Fosforo, Indio, Germanio, Gallio, Alluminio) per la realizzazione di trasmettitori e commutatori ottici ad elevata capacità e velocemente riconfigurabili via software, mantenendo i costi ed i consumi a livelli sostenibili. Il grafene è oggi ampiamente studiato per una vasta gamma di applicazioni e si è dimostrato molto adatto per circuiti integrati fotonici. In particolare, il grafene è un materiale compatibile con le tecnologie fotoniche basate sull'uso del silicio nel processo tecnologico a metallo-ossido-semiconduttore con accoppiamento complementare (CMOS), in grado di poter sfruttare al meglio le proprietà optoelettroniche uniche del grafene. Il grafene consente il miglioramento di un numero di funzioni fotoniche come la modulazione della luce in un'ampia banda di interesse per le telecomunicazioni come nell'infrarosso vicino. Grazie all'efficiente capacità del grafene a realizzare un efficace effetto di elettro-assorbimento e di elettro-rifrazione della luce in una guida d'onda al silicio, all'aumentare della frequenza di trasmissione i voltaggi necessari per pilotare modulatori e commutatori ottici risultano essere molto più contenuti rispetto allo stato dell'arte (<1 Volt rispetto agli attuali 3-4 V per circuiterie fotoniche in silicio). Per quanto riguarda la modulazione del segnale ottico inoltre è stato rilevato sperimentalmente che il grafene può introdurre del "chirp" utile a compensare gli effetti di distorsione lineare causati dalla dispersione cromatica in fibra ottica. Ciò consente trasmissioni su distanze e bande di trasmissione sempre più grandi, riducendo al tempo stesso il ricorso a tecniche di compensazione complesse e poco scalabili con le caratteristiche fisiche del canale di trasmissione. Molti dati risultanti dalle attività di ricerca e sviluppo in Europa mostrano che, variando il livello di Fermi di uno strato monoatomico di grafene depositato su una guida d'onda ottica attraverso una opportuna tensione di pilotaggio, l'assorbimento della guida d'onda stessa cambia ma con un simultaneo effetto elettro-rifrangente (cambiamento dell'indice efficace nella guida d'onda in silicio). Questo risulta in una modulazione crescente della fase ottica del segnale viaggiante in guida che è proprio il "chirp" in grado di scalare e compensare gli effetti di dispersione cromatica al variare della capacità e della lunghezza d'onda del canale e della distanza.

Un altro aspetto importante delle comunicazioni in generale che può essere rivoluzionato dall'uso del grafene è la commutazione dei segnali. La commutazione fotonica è uno degli argomenti fondamentali dell'integrazione ottica. Grazie allo sviluppo della tecnologia fotonica basata sul silicio, che oggi raggiunge alta miniaturizzazione e basso costo, si possono realizzare matrici di elementi di commutazione per aggiungere una piena raggiungibilità delle risorse di informazione e di processamento dati delocalizzate in diversi punti della rete stessa. Queste matrici di commutazione possono essere realizzate in diverse tecnologie. Quella più avanzata e che garantisce altissimi livelli di integrabilità delle funzioni ottiche (e.g. più di mille funzioni integrabili in meno di una decina di millimetri quadri) è quella basata sul Silicio e sul Nitruro di Silicio (Si3N4) in cui l'elemento di commutazione ottica è il risuonatore micro-ring. Le soluzioni legate a queste nuove tecnologie stanno oggi offrendo nuove prospettive di sviluppo in particolare per le reti di accesso Telecom e per i Datacenter che richiedono più alti volumi di produzione ed un rapido e funzionale aggiornamento delle capacità di interconnessione. Per esempio, per realizzare la funzionalità di add/drop, che serve ad aggiungere o selezionare canali trasmissivi su uno stesso mezzo di comunicazione (e.g. la fibra ottica nel caso specifico delle tecnologie fotoniche), si modificano gli stati di risonanza dei risuonatori micro-ring variando termicamente il loro punto di lavoro. I micro-ring sono in grado di selezionare una lunghezza d'onda e su attivazione di un segnale di controllo spostarla da una via di propagazione ad un'altra svolgendo così la funzione di commutazione ottica su guida d'onda. Questa commutazione può aggiungere o prelevare un canale a larga banda trasmissiva da e verso un flusso informativo che viene realizzato su una qualsiasi connessione ottica. Questo tipo di commutazione viene proposta per comunicazioni ad elevata capacità (e.g. 100, 400 Gbit/s e oltre) sia a breve raggio (e.g. pochi centimetri su guida d'onda in fotonica al silicio) che a lungo raggio (e.g. decine di km in fibra ottica) posizionati sulla stessa o su diverse piattaforme di comunicazione. In particolare, la commutazione è realizzata sfruttando l'effetto termo-ottico mediante mezzi riscaldatori Joule metallici integrati in prossimità della guida d'onda risuonante ad anello (e.g. Microring Resonator). Anche se l'effetto termo-ottico è molto efficiente sul silicio, l'attuazione termo-ottica richiede un continuo consumo di energia che può facilmente salire fino a qualche milliwatt. In una complessa matrice di commutazione con decine o più elementi risonanti in cascata, questo consumo di potenza può diventare non sostenibile. Questo tipo di realizzazione può limitare la densità di canale in lunghezza d'onda in sistemi in cui viene utilizzata la multiplazione a suddivisione lunghezza d'onda (e.g. sistemi WDM) per via delle operazioni di allineamento alla risonanza di canale che andrebbe ad interessare bande trasmissive adiacenti generando diafonia e fissando, di fatto, un limite inevitabile alla minima distanza di separazione spettrale tra i canali trasmessi. Per superare questi limiti in modo sostenibile sono necessari approcci alternativi. Con il grafene è possibile assorbire tutta la luce in fase di non risonanza di un singolo micro-ring piuttosto che realizzare una variazione di stato con controllo termico che tra le altre cose può causare una variazione di stato anche nei micro-ring in prossimità causando ulteriore diafonia non controllata. Il grafene è un materiale versatile e può essere utilizzato con ottica sintonizzabile come quella dei micro-ring condizionandone il funzionamento e le specifiche di risonanza senza ricorrere all'alterazione termica ma semplicemente applicando una tensione di controllo piccola e compatibile con i processi di produzione CMOS solo quando è necessario, inibendo o abilitando il

passaggio della luce nel micro-ring solo in caso di operabilità effettiva. Questa soluzione consente un risparmio energetico consistente ed una più semplice realizzazione della circuiteria elettronica di controllo del commutatore fotonico. Realizzazioni prototipali di commutatori ottici basati sul grafene sono in corso d'opera e primi interessanti risultati riportano una velocità di commutazione inferiore a 90 picosecondi per poter commutare segnali di capacità a 50 Gigabit al secondo, con un corrispettivo consumo energetico per bit molto inferiore ad un pico Joule. Altre attività sperimentali e di sviluppo prototipale sono in corso per realizzare dispositivi con velocità di commutazione sempre più alte per canali a più elevata capacità trasmissiva (e.g. tempo di commutazione pochi pico secondi per canali a 100, 400 Gigabit/s e superiori).
Seguendo gli sviluppi attuali della tecnologia in grafene sia in Italia che in Europa a breve sarà possibile pensare di integrare migliaia di funzionalità ottiche in poche centinaia di micrometri quadri con una resa di produzione sempre crescente su wafer di silicio sufficientemente grandi per alti volumi di produzione (e.g. wafer da 300 mm), intercettando le prossime richieste di dispositivi ottici realizzati con tecnologia CMOS. Come riferimento importante nel contesto europeo, per poter riscontrare l'impatto innovativo delle soluzioni in grafene fin qui citate, vi sono i risultati di ricerca e innovazione della Graphene Flagship. È una iniziativa di ricerca ed innovazione dell'Unione Europea di durata decennale nata nel 2013, con un investimento complessivo di 1 miliardo di euro. In questa iniziativa è rilevante il contributo dei partner italiani del consorzio tra i quali si segnalano: AUREL S.p.A.; Baldassari Cavi; Breton S.p.A.; Centro Ricerche Fiat S.C.p.A. (CRF); CNIT; CNR National Research Council; Delta-Tech S.p.A.; Ericsson Telecomunicazioni; Greatcell Solar Italia SA; FBK Bruno Kessler Foundation ; Fondazione Edoardo Amaldi; IIT Italian Institute of Technology; GNext; Italcementi Group; Leonardo; Lithops; Nanesa ; Nokia Italia; Politecnico di Milano; Scuola Internazionale Superiori di Studi Avanzati; Università di Bologna; Università di Padova; Università di Pisa ; Università di Salerno; Università di Trieste; Università Tor Vergata.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

Gli attuali costi di sviluppo e realizzazione dei dispositivi in grafene sono stimati più elevati dei corrispondenti dispositivi in silicio a causa della necessità di dover adattare un processo CMOS alle evoluzioni della tecnologia in grafene e dovendo aggiungere un ulteriore passaggio produttivo per la deposizione del grafene e la sua integrazione su un wafer di silicio. È difficile dare una stima precisa ma ci si aspetta che per passare dalla attuale fase di validazione tecnologica alla attuazione di un processo industriale siano necessari finanziamenti confrontabili con quelli stanziati dalla Unione Europea per le attività della Graphene Flagship. L'investimento europeo complessivo è di 1 miliardo in dieci anni. Investimenti della stessa entità sono riscontrabili anche in Asia ed in America.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 7

TECNOLOGIE PER LA SENSORISTICA CHIMICA

La sensoristica chimica ha avuto negli ultimi anni un larghissimo sviluppo a livello tecnologico cui ha fatto seguito un trend commerciale ancora in forte crescita. È facile intuire che questo trend non potrà che proseguire, in particolare considerando la forte espansione dei sensori smart in tecnologia MEMs, quelli indossabili e dotati di sistemi energy harvesting e wireless. Per quanto riguarda le applicazioni, questi dispositivi assumono una notevole rilevanza in settori commerciali chiave quali il monitoraggio ambientale, della qualità dell'aria, del monitoraggio di emissioni industriali, discariche, depuratori, e della diagnostica biomedicale, solo per citarne alcuni. Nello scenario futuro di Internet of Things, l'importanza e la diffusione dei sensori chimici, nonché la grande influenza su tutti gli aspetti della nostra vita quotidiana, sono destinate ulteriormente a crescere.

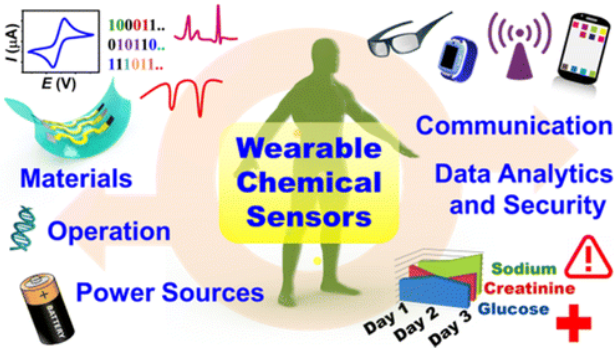


FIG. 27 IMPATTO SENSORI CHIMICI IN DIVERSI AMBITI APPLICATIVI

Di seguito, fra tutte le tipologie di sensori chimici, faremo riferimento in particolare ai sensori di gas e biosensori.

Sensori di gas a stato solido

Oggigiorno l'interesse nel settore sensori dei gas a stato solido è rivolta allo sviluppo di dispositivi basati sulla tecnologia MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) realizzati utilizzando metodologie di fabbricazione ampiamente note nell'industria dei semiconduttori per la lavorazione del silicio che consentono la realizzazione di strutture meccaniche tridimensionali micrometriche.
Per la nuova generazione di sensori smart, le dimensioni ridotte risultano infatti un parametro indispensabile, insieme alla bassa dissipazione di potenza, rivolte soprattutto a mantenere al minimo il consumo energetico del dispositivo. Per questo, i sensori in tecnologia MEMS includono al loro interno un microcontrollore che elabora, memorizza Cloud/Flash) ed invia (con collegamento wireless/wired) i dati del sensore ad intervalli di tempo regolari, diminuendo ulteriormente la richiesta di energia. Step di fabbricazione ibridi, che includono ad es. i processi di deposizione del materiale sensibile sui substrati flessibili, o direttamente sul tessuto, mediante ink-jet printing o

screen-printing, si presume verranno comunque ancora ampiamente utilizzati per la forte espansione dei sensori indossabili.

Biosensori

Attualmente, i biosensori vengono principalmente utilizzati nel settore biomedicale (es. sensori elettrochimici per monitorare i livelli di glucosio nel sangue) ma essi hanno un enorme potenziale anche in altre aree di applicazione, come nell'analisi delle acque, nel settore farmaceutico e nell'agrifood (protezione alimentare, sicurezza microbica degli alimenti, test per gli OGM, screening per residui di pesticidi). Negli ultimi anni si è assistito ad una enorme sforzo orientato principalmente verso lo sviluppo di sensori che possano integrare (e in parte sostituire) le procedure di analisi standard di laboratorio. L'attività di R&D futura nelle tecnologie biosensoristiche per il settore biomedicale sarà particolarmente pressante dovuta principalmente alla aumentata domanda di dispositivi sistemi integrati miniaturizzati e a basso costo da portare nell'ambiente di vita dei pazienti per monitorarne lo stato di salute. Tali sistemi sensoristici possono essere indossabili o impiantati. I dispositivi medici impiantabili sono quelli inseriti all'interno del corpo umano. Anche se questi rappresentano il futuro della sensoristica ad uso diagnostico, quelli indossabili sono invece una realtà consolidata. Oggigiorno i dispositivi indossabili stanno diventando sempre più confortevoli, anche grazie allo sviluppo di nuovi polimeri flessibili e alla progressiva miniaturizzazione dei sensori e dei circuiti elettronici. E sono anche svariati i campi biomedicali in cui trovano applicazione, che vanno dal controllo dell'attività fisica, al monitoraggio di parametri vitali e al controllo/prevenzione domiciliare di patologie croniche.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Grazie alle loro caratteristiche di compattezza e bassi costi, i sensori chimici indossabili si stanno imponendo e lo saranno ancora di più nell'immediato futuro. La previsione è quella che troveremo questi dispositivi, integrati nello stesso package, come accessori fondamentali nell'elettronica di consumo portatile (smart phone, tablet PC, netbook) o direttamente indossati.



FIG. 28 APPLICAZIONE BIOMEDICALE CHE UTILIZZA UN SENSORE CHIMICO EMBEDDED

Applicati all'ambito biomedicale, tali dispositivi consentono già oggi di spostare dal laboratorio al letto del paziente (ed eventualmente al suo domicilio) la diagnosi e/o il controllo di talune patologie, permettendo indubbi vantaggi in termini di costo assistenziale, di condurre analisi con maggiore frequenza anche in assenza di operatori qualificati, consentendo una più efficace azione di prevenzione nei soggetti a rischio e un monitoraggio più continuo e sistematico del decorso della malattia.
Il mercato globale dei biosensori nella diagnostica medica è in forte incremento da anni. Si stima che soltanto il mercato globale dei dispositivi indossabili raggiungerà quota 18,9 miliardi di dollari nel 2020, con un tasso di crescita annuale composto (CAGR) del 30% circa. Moltissime aziende consumer, Sony, Samsung e Apple, per citarne alcune tra le più importanti, hanno immesso/immetteranno sul mercato i propri dispositivi indossabili. L'attrazione di investimenti, anche esteri, legati allo sviluppo e alla validazione di tali tecnologie è un'azione necessaria al sistema-Italia se si vorrà lavorare e indirizzare la ricerca in questo settore altamente redditizio, ma anche fortemente competitivo.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Come facilmente intuibile, sarà il mercato a spingere verso le attività di R&D più promettenti. Queste vanno nella direzione di una più spinta miniaturizzazione dei sistemi attuali con la realizzazione di microsistemi di nuova concezione integrati sullo stesso chip che contiene il sistema elettronico per il data processing, finalizzata per i dispositivi indossabili (portatili e mobili).

Non soltanto aziende, ma anche Università/centri di ricerca a livello mondiale sono impegnati in attività di ricerca riguardanti la sensoristica chimica. Privilegiate a questo riguardo sono ricerche relative a nuovi materiali. Ad es. c/o il Massachusetts Institute of Technology (MIT) e la NASA si stanno studiando sensori chimici autoalimentati utilizzando nuovi materiali bidimensionali (2D) tra cui WSe_2 e MoS_2 e grafene, da impiegare in sistemi embedded che monitorano l'integrità strutturale di veicoli spaziali, la chimica di un ambiente estraneo o la salute di un astronauta attraverso tessuti intelligenti. La competizione a livello mondiale, sia nel settore sensori di gas a stato solido che biosensori, è alquanto serrata e per questo aziende di grande spessore stanno compiendo grossi investimenti. In Italia le attività di R&D sono qualitativamente in linea con quelle delle aziende più avanzate a livello mondiale. Tuttavia, come già rilevato nella precedente edizione di questa rassegna, sul mercato italiano si ritrovano soltanto piccole aziende (la situazione purtroppo non appare affatto mutata a tutt'oggi) molte di queste nate come spin-off universitari o aziende di start-up, con limitati capitali e personale e che sviluppano/commercializzano prodotti, sia pur tecnologicamente avanzati, ma che riguardano soltanto applicazioni di nicchia.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

150 milioni di euro

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 8

MATERIALI SMART TECNICHE DI FABBRICAZIONE ADDITIVA E METAMATERIALI PER MICROSISTEMI

Microsistemi - MEMS

Il mondo dei Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) o Microsystems (v. [1]), e più in generale quello dei sensori e attuatori, è in rapida espansione (vedi fig. 29 e 30). La presenza nel mercato MEMS quindi risulta strategico per un'azienda high tech, ed in particolare nel 2017 STMicroelectronics ha fatturato 757M$, risultando terza nella classifica mondiale dei produttori di prodotti MEMS.

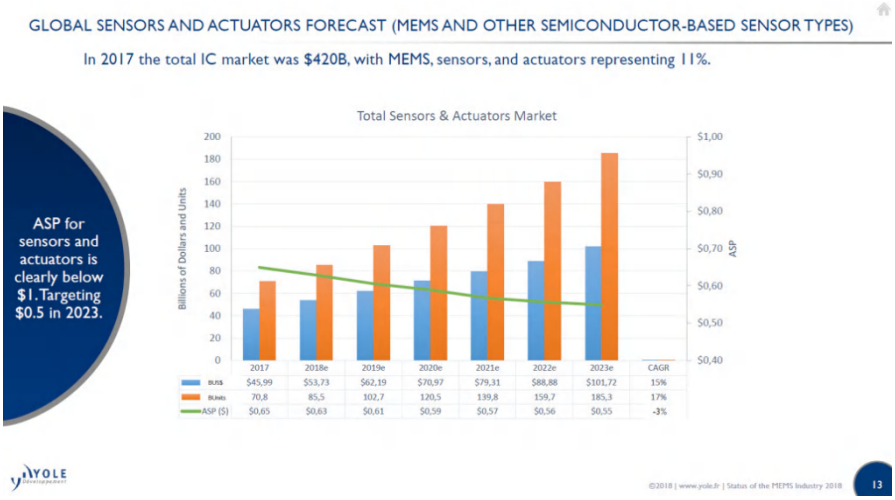


FIG. 29 PREVISIONE DI MERCATO PER SENSORI E ATTUATORI. DA [2].

Dopo una fase pioneristica in cui i microsistemi sono stati oggetto di intensa ricerca accademica, l'industria dei microsistemi è stata spinta dalle applicazioni in ambito automotive e successivamente in ambito consumer.

La crescita esponenziale del mercato consumer per i MEMS è stata recentemente trainata principalmente dall'uso di sensori inerziali installati a bordo di smartphones. I sensori miniaturizzati sono così diventati una componente essenziale di ogni smartphone e di molti altri dispositivi a disposizione del grande pubblico, quali laptops, orologi, dispositivi indossabili.

La terza fase dell'espansione del mercato per i MEMS è attualmente trainata dall'IOT e dai veicoli a guida autonoma. In entrambi i casi la sensoristica miniaturizzata è parte essenziale dello svi-

luppo tecnologico. A fianco di questa prospettiva di grande espansione, si hanno altri settori in cui i microsistemi stanno acquisendo crescente importanza, fra questi sicuramente il settore biomedicale, il monitoraggio di strutture ed infrastrutture, i dispositivi di sicurezza per edifici ed impianti industriali e contro attacchi di tipo terroristico. Si vedano a questo proposito le fig. 31-32 tratte da [2].

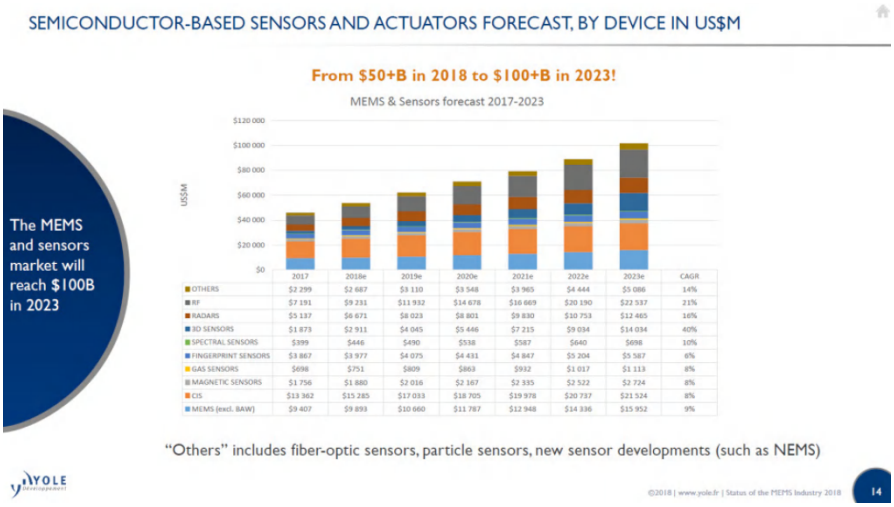


FIG. 30 PREVISIONE DI MERCATO PER SENSORI E ATTUATORI CON RIPARTIZIONE PER DISPOSITIVI [2].

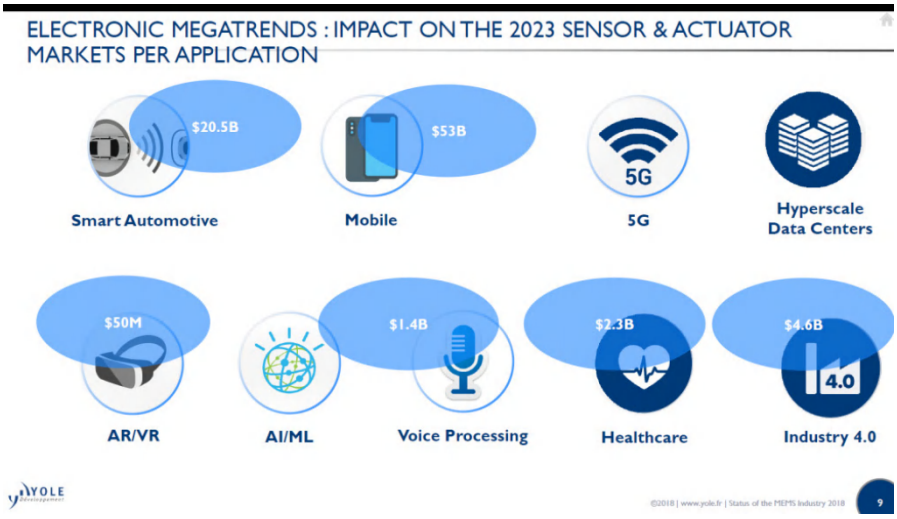


FIG. 31 TENDENZE DI MERCATO PER SENSORI E ATTUATORI [2]

Lo scenario di sviluppo per i MEMS appare estremamente ampio. Come si nota dalla fig. 33, il mondo dei sensori e attuatori è sempre più diversificato; i dispositivi miniaturizzati, MEMS, si possono ormai trovare come sensori e attuatori in forme ed applicazioni molto diverse.

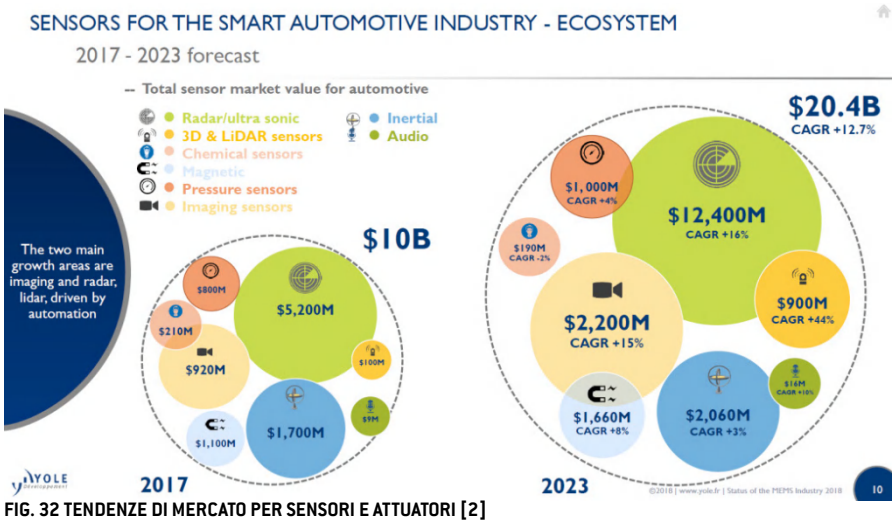


FIG. 32 TENDENZE DI MERCATO PER SENSORI E ATTUATORI [2]

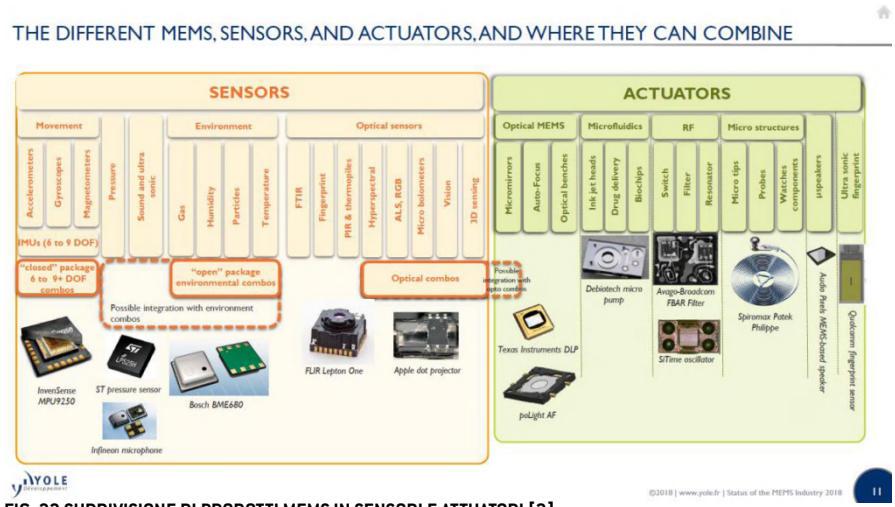


FIG. 33 SUDDIVISIONE DI PRODOTTI MEMS IN SENSORI E ATTUATORI [2]

La crescente complessità dei dispositivi MEMS e delle loro applicazioni richiede particolare attenzione ad alcuni aspetti fondamentali.

I sensori inerziali, e più in generale le Inertial Measurement Units (IMU) che racchiudono in dispo-

sitivi multi-sensore strumenti di misura di accelerazione, velocità angolare, pressione e campo magnetico, progettati per il mercato consumer sono diventati prodotti a basso costo unitario diffusi in moltissimi dispositivi. Essi saranno sempre presenti in dispositivi mobili ma rappresentano ormai una tecnologia consolidata. Lo sviluppo di sensori inerziali è ancora necessario per un'ulteriore miniaturizzazione, per la riduzione dei consumi di energia, per l'aumento di precisione, sensitività e stabilità nei confronti di disturbi ambientali in applicazioni sempre più sofisticate. Un esempio è la navigazione in assenza di segnali GPS, più precisamente la indoor navigation; in questo caso le IMU difficilmente riescono attualmente a mantenere la precisione necessaria per la ricostruzione fedele di traiettorie all'interno di ambienti chiusi e geometricamente complessi.
Micro dispositivi a più alto valore aggiunto basati sull'utilizzo di materiali smart vengono attualmente sviluppati ed in parte già proposti sul mercato. In questi dispositivi si combinano i vantaggi della forte miniaturizzazione con quelli della presenza di materiali, ad esempio piezoelettrici, che permettono l'attuazione controllata e con voltaggi relativamente bassi.
Microsistemi che fanno uso di materiali piezoelettrici sono in fase di sviluppo avanzato ad esempio per la realizzazione di testine di stampanti a getto d'inchiostro, per la ricostruzione di impronte digitali, per la realizzazione di trasduttori ad ultrasuoni, per la realizzazione di microattuatori per la messa a fuoco di lenti miniaturizzate, per la creazione di risonatori miniaturizzati. Un esempio che attualmente attrae forte attenzione nell'ambito della ricerca sono i PMUT (Piezo Micro Ultrasound Transducer) .

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Materiali smart per microsistemi

Dalle precedenti considerazioni si comprende l'esigenza di investire nello studio e sviluppo di materiali smart, in particolare piezoelettrici, e nei relativi processi di fabbricazione che devono essere resi compatibili con la produzione di MEMS.
Materiali attualmente in uso sono il piombo-zirconato di titanio (PZT) ed il nitruro di alluminio (AlN). Il primo ha il vantaggio di maggiore efficienza in fase di attuazione, il secondo è in genere considerato migliore per il sensing.
Obiettivo a medio termine è la produzione di materiali piezoelettrici privi di piombo. L'AlN gode già di questa caratteristica, altri materiali, come il Potassio-Sodio-Niobato (KNN) sono attualmente oggetto di intenso studio, non solo per applicazioni in microsistemi.
Un esempio significativo dell'uso di materiali piezoelettrici in applicazioni alla piccola scala è il sistema di messa a fuoco basato sull'utilizzo di film sottili di materiale piezoelettrico per la deformazione controllata di una lente in materiale polimerico, rappresentato in fig. 34.
Strati sottili di materiali piezoelettrici sono un ingrediente fondamentale per la creazione di PMUT, emettitori e ricevitori di ultrasuoni miniaturizzati. Un esempio significativo di iniziativa imprenditoriale nata sulla fabbricazione ed utilizzo di PMUT è la start-up Chirp Microsystems, recentemente acquisita da TDK [4].

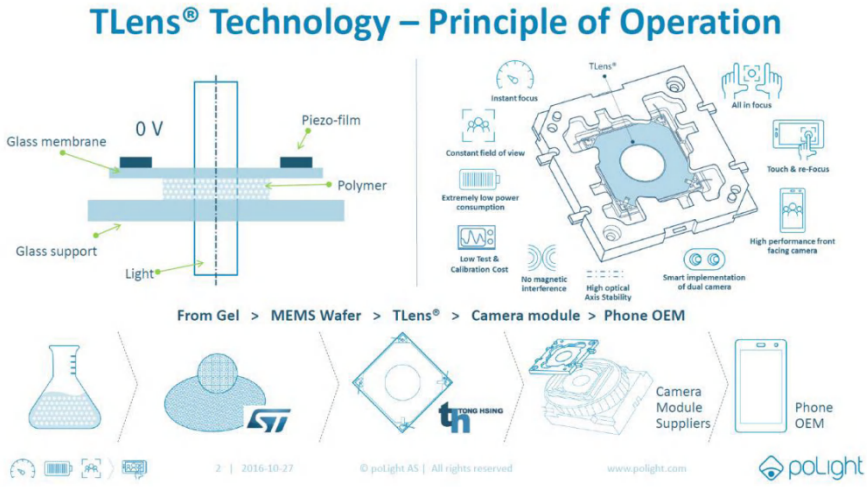


FIG. 34 DISPOSITIVO POLIGHT TLENSR. PRESENTAZIONE A SEMI WS GRENOBLE 2016, [3].

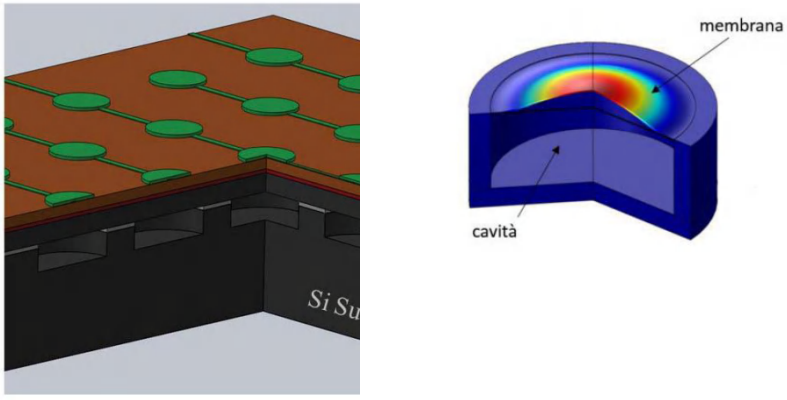


FIG. 35 SCHEMA DI PIEZO – MICRO – ULTRASOUND TRANSDUCER [4, 5]

Altri materiali smart potrebbero esser di grande interesse per applicazioni in MEMS. Un esempio significativo sono le leghe a memoria di forma (SMA) in grado di recuperare la forma originaria dopo un iniziale processo di deformazione seguito da una variazione di temperatura. Questo tipo di comportamento sarebbe molto utile per la creazione di micro attuatori e micro-robot. Più in generale il mondo dei microsistemi beneficerebbe molto della possibilità di fabbricare dispositivi con materiali di varia natura aumentando l'eterogeneità del manufatto e le sue potenzialità sia come attuatori sia come sensori.

Fabbricazione additiva per microsistemi

Tecniche di fabbricazione additiva, in genere identificate con il nome di "stampa 3D", si stanno diffondendo in molti settori industriali. Il vantaggio principale di tali tecniche risiede nella semplicità

e rapidità del passaggio da modello numerico tri-dimensionale dell'oggetto da realizzare alla sua fabbricazione e nell'ampia libertà di realizzare forme anche molto complesse.
A fianco dei vantaggi si hanno in genere forti limitazioni per quanto riguarda il tipo dei materiali con cui i manufatti si possono realizzare, la possibilità di abbinare materiali diversi e l'effettiva efficacia ed economicità di una produzione su larga scala. Tecniche di fabbricazione additiva presentano molti aspetti interessanti anche per la realizzazione di micro-dispositivi e quindi per il mondo dei MEMS. In [6], lavoro pubblicato nel 2013, gli Autori presentano un'ampia review delle possibilità offerte da tecniche di fabbricazione additiva alla micro-scala. Già nel 2013 si evidenziavano molte possibilità offerte dalle diverse tecniche. In [7] l'obiettivo è l'utilizzo di tecniche di 3D printing per la realizzazione di prototipi in tempi rapidi nel mondo dei MEMS. In [8], lavoro del 2017, si aggiornano le possibilità offerte per la realizzazione diretta di microsistemi.
Dallo studio della letteratura e dalle possibilità attualmente offerte dalle tecniche di manifattura additiva emerge che oltre alla rapida realizzazione di prototipi di studio nella fase di progetto, si hanno promettenti possibilità in particolare nell'utilizzo di stampanti a getto di inchiostro per la realizzazione di superfici micro-strutturate e nell'utilizzo di stampa 3D per la realizzazione di soluzioni di package finale dei prodotti.
Va infine osservato che le forti limitazioni dei processi litografici impediscono attualmente la realizzazione di schemi strutturali tri-dimensionali in microsistemi. Alcuni dispositivi con proprietà meccaniche legate alla tri-dimensionalità degli schemi potranno in futuro essere creati solo uscendo dai vincoli di planarità dei processi litografici e sfruttando le potenzialità della manifattura additiva. In questa direzione vanno alcune recenti proposte, come ad es. la [9].

Metamateriali per microsistemi

Le possibilità offerte attualmente, e specialmente nel prossimo futuro, dalle tecniche di fabbricazione additiva discusse brevemente nella precedente sezione, aprono la strada ad un'altra notevole innovazione per il mondo dei microsistemi.
Si tratta di trarre vantaggio, anche per oggetti realizzati alla micro-scala, delle straordinarie possibilità derivanti dalla progettazione di metamateriali, che possiedono proprietà diverse dalle comuni proprietà offerte dai materiali naturali. Progettando geometrie particolari e combinando differenti materiali, si possono ad esempio realizzare metamateriali con coefficiente di Poisson nullo o negativo (materiali auxetici), con coefficiente di dilatazione termica nullo o negativo, in grado di schermare onde elettro-magnetiche o elasto-acustiche. Esempi sono i metamateriali chiamati cristalli fotonici od i cristalli fononici descritti in dettaglio in [10]. Proprietà auxetiche e fononiche possono anche essere combinate, come dimostrato recentemente in [11].
In recenti lavori si intravedono già le notevoli possibilità offerte dalla combinazione fabbricazione additiva – metamateriali nel mondo dei MEMS. A titolo di esempio viene proposta una metasuperficie in grado di modificare le proprietà di riflettività nell'infrarosso grazie ad una modifica di un reticolo di microstrutture resa possibile dalla particolare architettura progettata.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

5 milioni di euro, per 2 anni

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

[1] A Corigliano, R. Ardito, C. Comi, A. Frangi, A. Ghisi, S. Mariani. Mechains for Microsystems. 424 pag. Wiley, ISBN 978-1-119-05383-5, (2018)

[2] Yole - status of the MEMS Industry 2018.

[3] www.polight.com

[4] http://www.chirpmicro.com/

[5] Y.Lu, D.A. Horsley. Modeling, Fabrication, and Characterization of Piezoelectric Micromachined Utrasonic Traducer Array Based on Cavity sOI Wafers. J MEMS, 24, 4, 1142-1149, 2015.

[6] M Vaezi, H Seitz, S. Yoang. Areview on 3D micro-additive manufacturing technologies. Int. J Adv. Manuf. Technol., 67, 1721-1754,2013.

[7] V.A. Lifton, G. Lifton, Steve Simon. Options for additive rapid prototyping methods (3D printing) in MEMS technology. Rapid Prototyping Jaurnal, 20, 5, 403-412, 2014.

[8] K- s- Teh. Additive direct-writemicrofabrication for MEMS: A review. Front. Mech. Eng. 2017, 12(4), 490-509, 2017.

[9] V. Zega, C. Credi, R. Rernasconi, G. Langfelder, L. Magnin, M. Levi, A. Corigliano. The first 3D-printed z-axis accelerometers with differential capacitive sensing. IEEE Sensors, 18, 1 53-60. (2018).

[10] Laude. Phononic crystals. Aritifical Crystals for Sonic, Acoustic and Elastic Wawes. De Gruyter, ISBN 978-3-11-030265-3.

[11] I. D'Alessandro, V. Zega, R. Ardito, A. Corigliano. 3D auxetic single material periodic structure with ultra-wide tunable bandgap *Scientific Reports*, 8 (1), 2262 (2018).

[12] J.B. Reeves, R.K. Jayne, T.J. Stark, L.K. Barret, A.E. White, D.J. Bishop. Tunable infrared meta-surface on a soft polymer scaffold. Nano Lett. 18, 2802-2806, 2018.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 9

ELECTRONIC ARTIFICIAL OLFACTORY SYSTEMS (ENOSE)

AMBIENTE APPLICATIVO

I cosiddetti "sensori fisici", i dispositivi in grado cioè di rilevare e quantificare la variazione di grandezze quali, ad esempio, temperatura, pressione, forza, conducibilità, movimento, massa etc, pervadono in misura talmente intensa la nostra vita (si pensi, ad esempio alle decine di sensori presenti in uno smartphone o in un'automobile) che ci sembra di essere ormai in grado di poter concepire una apparecchiatura elettronica in grado di "afferrare" ogni aspetto della realtà fisica, comunque complesso esso sia. Ebbene questa certezza crolla non appena si cerca di rilevare e/o quantificare, con sensori allo stato solido e non con tecniche tipiche della chimica analitica, composti chimici allo stato aeriforme o liquido. Così, mentre la visione artificiale ha, oggi, superato in termini di affidabilità, quella umana, in ambito chimico, anche il semplice discrimine di un odore da un altro, operazione semplicissima per ogni olfatto animale, può rivelare complessità impensabili se si vogliono utilizzare sistemi elettronici.

E dire che la ricerca di settore non è affatto recente: la nascita del primo sistema elettronico di olfatto artificiale (eNose) risale infatti ai primi anni 80 quando K. Persaud e G. Dodd, allora al dipartimento di biochimica dell'università di Warwick, tentarono di modellare e simulare il funzionamento del sistema olfattivo dei mammiferi sulla base di elementi sensibili a stato solido. I sensori disponibili allora erano prevalentemente basati su ossidi metallici ed erano affetti in maniera rilevante da mancanza di selettività e stabilità. Ciò nonostante essi riuscirono nell' intento di discriminare tra circa 20 odori differenti utilizzando 3 sensori e differenziando visivamente le configurazioni di risposta di questi.

In ogni caso il termine naso elettronico divenne comune soltanto a cavallo tra la fine degli anni '80 e l'inizio degli anni '90, quando vennero depositati alcuni significativi brevetti ed una prima conferenza NATO tenutasi in Islanda nel 91 divenne una pietra miliare per lo sviluppo di questi sistemi. Fondamentale per la diffusione e l'evoluzione dell'architettura fu il lavoro di ingegnerizzazione, approfondimento tecnologico e divulgazione svolto da J.W. Gardner e W. Gopel con i loro rispettivi gruppi. Dopo gli entusiasmi iniziali divennero ben chiare le limitazioni del naso elettronico legate principalmente alla difficoltà di ottenere sensori specifici e stabili per un numero sensibilmente alto di sostanze come quelle rilevabili, per esempio, dai neuroni olfattivi. L'ingegnerizzazione dell'architettura si concentrò sulla specializzazione dell'apparato per un campo applicativo ben specifico all' interno del quale fosse possibile sfruttare al meglio le capacità dell'array di sensori prescelto. Non bisogna dimenticare infatti, nel paragonare l'olfatto artificiale a quello naturale, che sebbene il secondo sia dotato di un numero di recettori capaci di apportare informazioni significative e selettive molto maggiori, è possibile fabbricare ed utilizzare dei rivela-

tori ad hoc per sostanze ai quali nessun naso biologico, umano od animale, è sensibile. Un classico esempio è dato dall' ossido di carbonio la cui rilevazione non era di alcun significato evolutivo prima della scoperta del fuoco talché nessun rilevatore biologico è stato messo a punto per esso. Con questo approccio sono stati concepiti e, in qualche caso sviluppati, negli ultimi 40 anni, eNose specifici per molti settori applicativi (tab. II).

TAB II NASI ELETTRONICI: SETTORI DI UTILIZZO ED APPLICAZIONI

SETTORE	APPLICAZIONE/FUNZIONE
Agroalimentare/zootecnia	• Tracciabilità dei cibi; • Antisofisticazione; • Controllo ambientale in serre; • Controllo ambientale in allevamenti;
Ambientale	• Controllo dell'inquinamento in città; • Controllo dell'inquinamento in ambienti chiusi (IAQ); • Controllo delle emissioni nocive o moleste; • Sorveglianza di aree vulcaniche; • Controllo delle acque potabili ed industriali;
Biomedicale	• Diagnostica precoce di varie patologie; • Controllo automatico dello stato di salute in pazienti non autosuffienti;
Controllo Processi Industriali	• Controllo di qualità del prodotto e del processo di fabbricazione in industrie di packaging, alimentari, trasporti. • Controllo del livello di pulizia; • Formulazione di nuovi prodotti; • Manutenzione avanzata;
Aerospaziale	• Controllo della integrità di parti della struttura dell'aeromobile • Controllo dell'aria in cabina ed in stazioni spaziali;
Sicurezza	• Sorveglianza di luoghi potenzialmente rischiosi per l'uomo; • Detection di esplosivi; • Detection di droghe;

Poiché si tratta, in generale, di sistemi discreti ancora piuttosto ingombranti e poco maneggevoli, la recente esplosione dello scenario IoT, ha sollecitato, anche in questo ambito, una intensa attività di R&D che mira, sostanzialmente, alla realizzazione di prodotti caratterizzati da una portabilità simile a quella di uno smartphone, dunque più prossima a quella tipica di un mercato "consumer" ed è proprio in relazione alle problematiche relative a questo scenario, che ci concentreremo nei paragrafi successivi.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

È piuttosto complesso censire con esattezza quali siano gli attori principali che operano, oggi, in questo settore: il mercato di riferimento è ancora piuttosto incerto e le stime più affidabili, ad oggi, non lo quantificano oltre qualche decina di milioni di euro, complessivamente. In un lavoro del 2003 erano censiti circa 17 operatori del settore (Handbook of Machine Olfaction: Electronic Nose Technology, edited by T.C. Pearce, S.S. Schiffman, H.T. Nagle, J.W. Gardner, 2003 WILEY) saliti poi ad oltre 23 in un lavoro di rassegna del 2008 (F.Rock, N. Barsan, U. Weimar, Chem. Rev. 2008, 108, 705-725). Più di recente (2017) un report di una azienda specializzata in analisi di mercato, ne segnala non più di una decina.

Se si vanno ad analizzare, nei lavori sopra citati, i singoli prodotti, si vede che in molti casi le tecnologie utilizzate sono quelle tipiche della chimica analitica (per esempio la spettrometria di massa) difficilmente scalabili in prodotti indirizzabili ad un mercato consumer. Per quanto concerne le apparecchiature che si basano invece su sensori a stato solido, le tecnologie dominanti sono oggi ancora quelle dei dispositivi basati su ossidi metallici (MOX), seguite da sensori elettrochimici (EC), da sensori ad onda acustica superficiale (SAW) e da microbilance al quarzo (QMB). In linea di principio, dunque, si tratta nella gran parte dei casi di sensori basati su variazioni di conducibilità elettrica e che dovrebbero, perciò, essere facilmente scalabili in termini di numero di prodotti realizzabili e di dimensioni specifiche, caratteristiche entrambe essenziali per poter effettivamente pensare ad applicazioni di massa. D'altro canto i processi CMOS, tipici della elettronica di largo consumo, impongo vincoli estremamente rigidi in termini di temperature di lavoro, temperature di processo, disegno del dispositivo e tipologie di materiali comunemente processabili (J. Gardner et al. IEEE Sensors Journal, 2010). Tutti questi vincoli rendono di fatto estremamente complesso andare verso una integrazione di prodotto così come richiesto, per esempio, dalla Multi-Annual Strategic Plan (MASP) della ECSEL (Electronic Component and Systems for European Leadership, 2018) e, in effetti, ancora oggi non esistono applicazioni di massa riferibili all'eNose anche se, come si vedrà più avanti, esistono già applicazioni consolidate che lasciano intravedere ampi mercati per questo tipo di apparecchiature elettroniche.

Al di là del case e della sensor chamber, gli altri elementi costruttivi (Control System/user interface, AFE/condizionamento, sistema fluidico) sono tutti destinati ad un progressivamente sempre più elevato livello di miniaturizzazione. Critico resta invece proprio il cuore dell'apparecchiatura elettronica, l'array di sensori.

In fig. 36 è riportata l'architettura tipica di un naso elettronico. Come si può vedere, al di là degli aspetti più relativi all'industrial design (case e sensor chamber), allo stato la criticità maggiore dal punto di vista della integrazione di processo sta proprio nella parte relativa ai sensor array, oggi discreti e spesso non ancora caratterizzati da una tecnologia di elezione. Ciò nonostante cominciano ad apparire oggi sul mercato o in lavori di ricerca ad alto TRL, dispositivi sensori chimici caratterizzati dal fatto di essere prodotti con processi CMOS compatibili. In fig. 37 ne sono riportati 2 esempi, il primo relativo ad un prodotto già in commercio della azienda giapponese Figaro ed il secondo, realizzato dall'università del Texas, costituito da un array di sensori chimici basati su grafene, anche questo array essendo stato ottenuto con un processo compatibile con quelli caratteristici dell'elettronica di largo consumo.

Il sensore per VOC, TGS 8100 della Figaro è realizzato su Silicio con un processo CMOS- compatibile e che, dunque, apre la strada ad una classe di dispositivi sensori chimici perfettamente integrabili. L'array a destra è stato invece realizzato nell'università del Texas (Austin) dal gruppo del prof. Akinwande ed è basato su sensori al grafene integrati in un chip al silicio con tecnologia da 0.18 micron (npj 2D Materials and Applications, 2017).

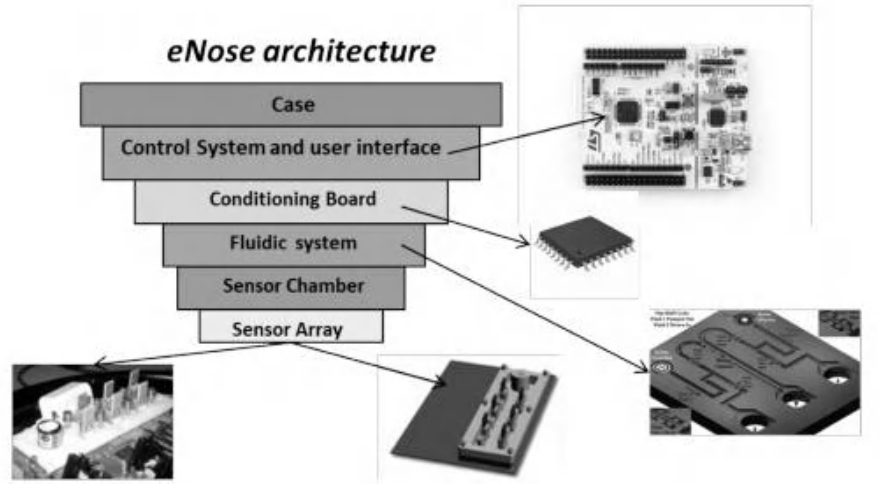


FIG. 36 ARCHITETTURA TIPICA DI UN ENOSE.



FIG. 37 IL SENSORE PER VOC, TGS 8100 DELLA FIGARO

Opportunità applicative

La possibilità di realizzare dispositivi con tecnologie più compatibili col mercato consumer apre, di fatto scenari applicativi ed opportunità di mercato di grande interesse. Qui di seguito, sempre facendo riferimento agli scenari delineati nel documento ECSEL sopra citato, ci riferiremo a due possibili applicazioni già sperimentate, in via prototipale, in ENEA.

Settore Healthcare. In fig. 38 è mostrato un naso elettronico destinato al monitoraggio non invasivo di pazienti affetti da diabete di tipo 1, particolarmente nel segmento pediatrico. I valori di glicemia per un paziente affetto da diabete mellito di tipo 1 sono, di norma, superiori a 190 mg/dl. Oltre alla glicemia, importante è anche la chetosi che indica l'alterazione del metabolismo a causa del diabete. È la chetonemia a misurare il livello dei corpi chetonici nel sangue che aumentano se nel paziente diabetico c'è una bassa concentrazione d'insulina ciò che provoca una cattiva utilizzazione del glucosio nel sangue e quindi l'innalzamento della glicemia. È allora ragionevole pensare che la chetonemia, in certi contesti clinici, possa essere una misura indiretta della glicemia ed un indice di warning per una incipiente crisi diabetica. Il naso elettronico in fig. 38 basa il suo funzio-

namento principalmente su un array di sensori MOX al quale viene sottoposto un campione dell'espirato del paziente (ottenuto semplicemente raccogliendolo in opportuni sacchetti come quello visibile nella stessa figura).



FIG. 38 ENOSE ENEA PER LA DIAGNOSI PRECOCE DELLE CRISI IPOGLICEMICHE IN PAZIENTI DIABETICI

Nella fig. 39 sono raffigurate le mappe odorografiche che danno un'immediata visualizzazione della differenza che il naso coglie tra un paziente sano (immagine di sinistra) ed un paziente che presenta una crisi glicemica (immagine di destra). Un eNose è dunque in grado di essere già oggi di ausilio per le famiglie nella gestione dei pazienti diabetici: la possibilità di arrivare ad un naso integrato, di piccole dimensioni e di facile gestione aprirebbe di fatto scenari di mercato di grande interesse per le aziende del settore con lo sviluppo di apparecchiature di grande importanza per la cura di ammalati.

Nel settore Digital Iindustry (fig. 40) è invece raffigurato il naso elettronico ENEA utilizzato per il controllo automatizzato dei processi di fabbricazione oppure per la manutenzione avanzata nei settori aeronautico oppure automobilistico.

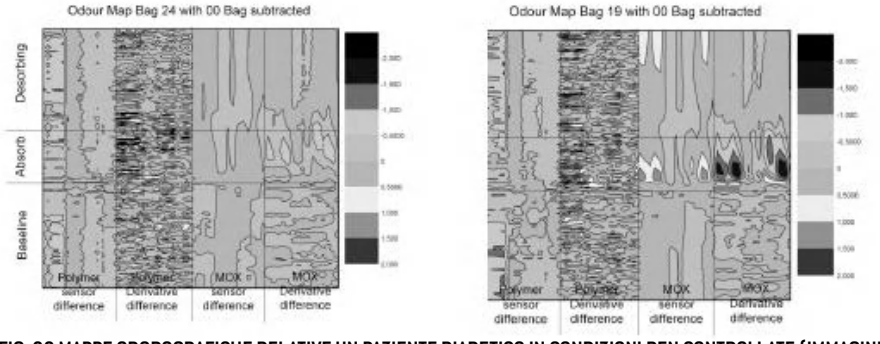


FIG. 39 MAPPE ODOROGRAFICHE RELATIVE UN PAZIENTE DIABETICO IN CONDIZIONI BEN CONTROLLATE (IMMAGINE DI SINISTRA) ED UN PAZIENTE CHE PRESENTA INVECE UNA CRISI GLICEMICA (IMMAGINE DI DESTRA).

In entrambi i settori l'utilizzo sempre più pervasivo dei CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymers) per la realizzazione delle strutture (fusoliere, ali, carrozzerie etc.) pone problemi sempre più severi in relazione alla individuazione di tecniche rapide e non distruttive in grado di evidenziare problemi di contaminazione superficiale provenienti da sostanze chimiche, inevitabili nell'utilizzo ordinario (per esempio carburanti, fluidi lubrificanti o protettivi) che possono però, di converso procurare danni alle strutture in plastica, ancorché rinforzata.

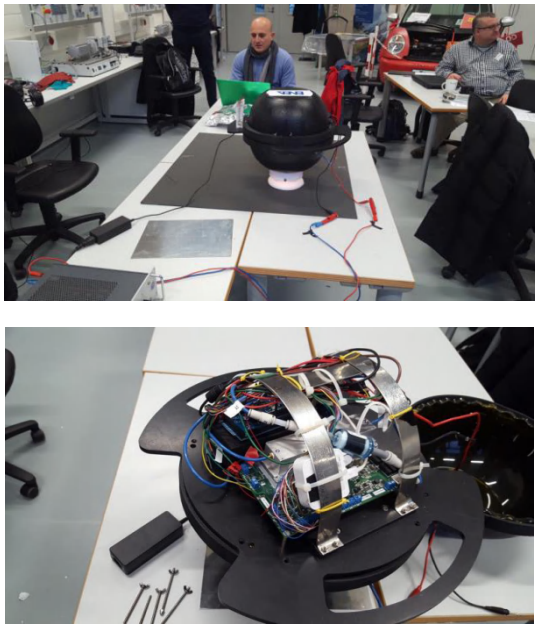


FIG. 40 ENOSE ENEA PER IL CONTROLLO AUTOMATIZZATO DEI PROCESSI DI FABBRICAZIONE OPPURE PER LA MANUTENZIONE AVANZATA NEI SETTORI AERONAUTICO MENTRE ANALIZZA UNA PARTE DI FUSOLIERA IN CFRP (IMMAGINE DI SINISTRA) E APERTO PER VISUALIZZARNE GLI ELEMENTI COSTITUENTI

La fig. 41 mostra anche in questo caso una mappa odorografica con la quale sono state individuate tracce minime dei composti chimici sopra citati, con una precisione comparabile con tecniche analitiche decisamente più complesse.

Per questo tipo di applicazioni la capacità di miniaturizzazione è importante, non tanto in relazione ai costi ma quanto piuttosto per la possibilità di realizzare apparecchiature in grado di controllare in maniera autonoma e rapida superfici anche assai estese: una fusoliera di un aereo di ultima generazione può arrivare anche a 800 m^2 e l'ispezione deve essere fatta punto per punto con una risoluzione di pochi mm^2, il che significa (nello scenario di industrial process control) anche oltre 1 miliardo di punti da analizzare. Perché questa tecnica risulti applicabile nella pratica è necessario che la parte da analizzare sia analizzata da migliaia di piccoli ragni simultaneamente.

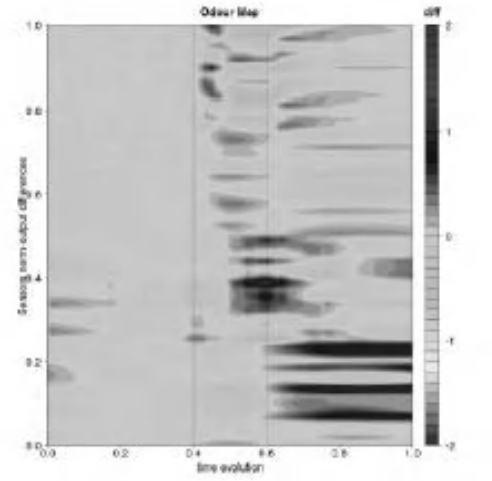


FIG. 41 MAPPA ODOROGRAFICA CHE CONSENTE L'INDIVIDUAZIONE DI TRACCE MINIME DI COMPOSTI CHIMICI DANNOSI PER I CFRP, CON UNA PRECISIONE COMPARABILE CON LE PIÙ COMPLESSE TECNICHE ANALITICHE.

Risorse Necessarie

AATTIVITÀ	INVESTIMENTO (M€)
R&D di sensori chimici integrabili in processi elettronici "large scale"	>50
Sviluppo di tecniche di calibrazione rapide	1 - 10

TAB IV RISORSE NECESSARIE PER LO SVILUPPO DI QUESTA TECNOLOGIA INNOVATIVA

Nella tab. IV sono riportate le risorse necessarie per lo sviluppo di questa tecnologia innovativa. Oltre a quella relativa direttamente allo sviluppo dei dispositivi, è importante anche sottolineare la necessità di mettere a punto tecniche rapide di calibrazione dei sensori chimici con metodologie assimilabili a quelle dell'industria elettronica. Fino ad oggi, infatti, l'industria di settore è stata caratterizzata dall'utilizzo, al più, di sensori fisici che scambiano, col mondo esterno, energia meccanica, calore oppure energia elettrica. L'impiego dei sensori chimici apre invece all'impiego di energia chimica che, per definizione, dà luogo, generalmente, a fenomeni di tipo irreversibile. Questo comporta la necessità di mettere a punto tutta un'altra serie di apparecchiature di caratterizzazione, anch'esse innovative per il settore elettronico e che richiedono un investimento non trascurabile in R&D.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 10

APPLICAZIONI ELETTRONICHE DELLA LUCE DI SINCROTRONE E LASER AD ELETTRONI LIBERI

Lo sviluppo di tecnologie abilitanti come quelle legate alla micro- e nano-elettronica richiede tecniche di fabbricazione, indagine e caratterizzazione dei materiali sempre più avanzate e capaci di guidare in modo efficace la progettazione dei dispositivi elettronici del futuro. Da molti anni stiamo assistendo ad una progressiva miniaturizzazione di transistori e memorie per aumentarne la densità di integrazione nei chip e per soddisfare le sempre più stringenti richieste del mercato di dispositivi potenti di ridotte dimensioni geometriche e ridotta dissipazione di potenza elettrica. Ne deriva che la manipolazione a livello nanoscopico della materia e lo studio di fenomeni su scala macro- e nanoscopica sono cruciali in questo ambito e in tale contesto sono di notevole rilevanza le tecniche di indagine analitica possibili solo grazie all'utilizzo della luce di sincrotrone. Elettra Sincrotrone Trieste è un centro di ricerca internazionale e multidisciplinare di eccellenza, specializzato nella radiazione di sincrotrone e laser a elettroni liberi e nelle loro applicazioni nelle scienze dei materiali. É l'unico centro di ricerca italiano che ospita un sincrotrone ed un laser a elettroni liberi (free-electron laser (FEL)) che, nel 2016, è stato incluso dal MIUR nel Piano Nazionale per le Infrastrutture di Ricerca (PNIR) come una delle sole undici Infrastrutture Globali d'interesse dell'Italia.

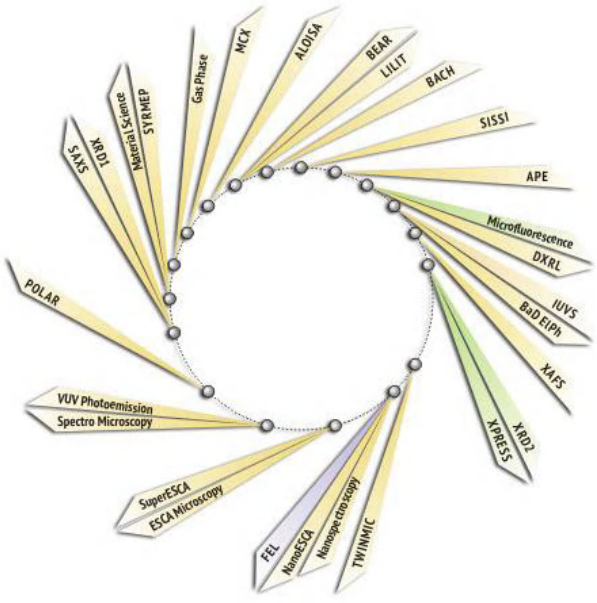


FIG. 42 LINEE DI LUCE SPERIMENTALI AD ELETTRA (IN ALTO) E FERMI (IN BASSO) E PRINCIPALI TECNICHE DI INDAGINE

Queste due sorgenti di luce producono fasci di fotoni che vanno dall'infrarosso ai raggi-X duri con intensità e componenti spettrali senza pari se confrontante con sorgenti convenzionali e consentono processi di sintesi, caratterizzazione e spettroscopia molto avanzate. La prima sorgente è un sincrotrone di terza generazione in cui gli elettroni vengono accelerati a velocità relativistiche e vengono accumulati nell'anello di accumulazione, Elettra, per produrre fasci molto collimati e intensi di radiazione elettromagnetica. La seconda sorgente è un laser a elettroni liberi (FEL) FERMI, in cui gli elettroni accelerati a velocità relativistiche sono stimolati a produrre radiazione coerente sotto forma di impulsi ultracorti con una brillanza di picco che è decine di miliardi di volte più alta rispetto a quella della luce di sincrotrone, ed è utilizzato per monitorare processi dinamici su scale temporali dell'ordine dei femtosecondi. Le due sorgenti di luce ospitano diverse linee di luce e laboratori sperimentali che, grazie alle caratteristiche di alta brillanza e alle componenti spettrali del fascio di luce generato, consentono di utilizzare un ampio spettro di tecniche di indagine analitica allo stato dell'arte elencate in fig.42. Elettra Sincrotrone Trieste si inserisce quindi in un contesto di ricerca di base e ricerca applicata di altissimo livello sul piano internazionale

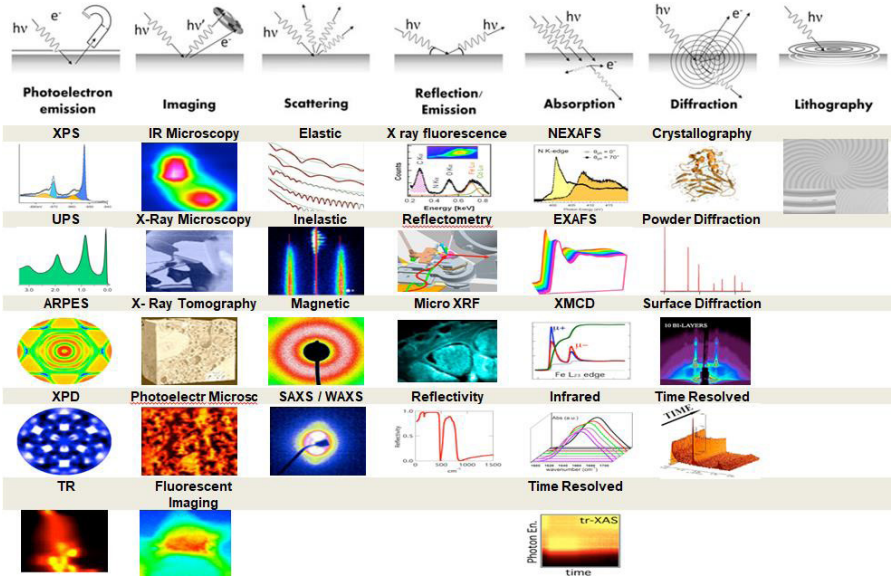


FIG. 43 TECNICHE ANALITICHE DISPONIBILI AD ELETTRA SINCROTRONE TRIESTE

La Società ha per statuto la missione di promuovere la ricerca in campi di rilievo ed opera in tal senso sia conducendo ricerca in proprio, sia offrendo all'utenza internazionale accesso alle proprie infrastrutture di ricerca. In particolare, fornisce accesso ad utenti scientifici internazionali sia di affiliazione accademica che industriale, applicando la politica di open-access tramite peer-review. Due volte all'anno vengono pubblicati bandi internazionali a seguito dei quali migliaia di utenti da oltre cinquanta Paesi inviano proposte per esperimenti che utilizzano le 35 linee di luce (29 presso Elettra e 6 presso FERMI). Le circa 900 proposte l'anno vengono valutate da

proposal peer review committees composti da esperti internazionali per le varie aree scientifiche e in media il loro numero supera di un fattore 2-3 il numero delle proposte che possono ricevere tempo-macchina per condurre esperimenti. In generale l'impatto delle attività di servizio di Elettra raggiunge, annualmente, ben oltre i 10.000 ricercatori.
Elettra è una società no-profit di interesse nazionale finanziata da diversi enti quali la regione autonoma Friuli Venezia Giulia, il Ministero dell'Educazione e dell'Università e della Ricerca. Ci sono poi diversi azionisti quali Area Science Park, il CNR e diversi contributi provengono da contratti di ricerca, costituiti in parte da contratti industriali e in parte da agenzie esterne tra la quali si annoverano la Commissione Europea, il MIUR, il Ministero per lo Sviluppo Economico, e il Centro Internazionale di Fisica Teoria di Trieste.
Le principali tecniche di indagine riportate in fig. 42 e con maggior dettaglio in fig. 43 vengono utilizzate per studi in-situ, anche durante le fasi di sintesi di nuovi materiali, per comprendere e quindi controllare le dinamiche della crescita, studiare le proprietà chimico-fisiche di sistemi su scala micro- e nanoscopica così come le proprietà elettroniche. Vengono sintetizzati ed analizzati materiali bulk come dispositivi ottici, elettronici e meccanici (MEMs) grazie alla litografia a raggi-X. Vengono inoltre cresciuti e caratterizzati dal punto di vista elettronico e strutturale, con risoluzione che si spinge fino al livello atomico, materiali semiconduttori di interesse per applicazioni in dispositivi elettronici di prossima generazione basati sulle nanotecnologie. Sono quindi studiate le proprietà di semiconduttori a film sottile, di superfici, di interfacce e le interazioni con il substrato. È altresì possibile analizzare le proprietà magnetiche interessanti per lo sviluppo di memorie e più in generale studiare le interazioni tra materiali diversi che, combinati tra loro formano sistemi dalle proprietà uniche. Alcuni esempi riguardano la sintesi e la caratterizzazione strutturale ed elettronica di nanotubi di carbonio, di nanofili in materiali semiconduttori di grande interesse per applicazioni elettroniche come quelli appartenenti ai gruppi III e V della tavola periodica degli elementi, di materiali 2D come il grafene o quasi-2D come i TMDs (Transition Metal Dichalcogenides), ma anche lo studio della distribuzione di atomi dopanti in semiconduttori, lo studio di eterostrutture 2D, di memresistor e dispositivi magnetici per lo sviluppo di memorie.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Nel caso delle grandi infrastrutture di ricerca di livello internazionale, quali Elettra e FERMI, la qualità e la competitività sono garantite dall'applicazione dell'open access che vede accettate e ospitate, senza un corrispettivo finanziario diretto, le migliori ricerche selezionate da peer review panels internazionali tra le proposte in risposta a calls for proposals. Questo metodo, adottato da tutte le maggiori infrastrutture di ricerca internazionali, sia nella UE che negli USA ed in Asia, assicura la massima competizione e la possibilità di attrarre i migliori ricercatori da tutto il mondo. La partecipazione alla pari di ricercatori italiani e stranieri a queste competizioni ne induce un continuo miglioramento per effetto del benchmarking tra i migliori ricercatori a livello internazionale. Sia Elettra che FERMI sono aperti alla comunità scientifica e all'industria. I principali paesi industrializzati dispongono generalmente di sincrotroni ma sicuramente Elettra è la facility più vicina all'Europa dell'est e in questo senso risulta essere il punto di riferimento per questo bacino

di utenza. Infatti il centro di ricerca attrae in misura crescente gli utenti provenienti dall'Europa centrale e dai paesi dell'Est, dove la domanda di radiazione di sincrotrone è in continuo aumento. Le prestazioni della sorgente di luce Elettra registrate negli ultimi anni hanno confermato che le attività di aggiornamento hanno portato la stabilità e la riproducibilità della macchina a un livello paragonabile se non superiore a quello delle sorgenti di luce più recenti quali la Swiss Light Source (SLS) in Svizzera, SOLEIL in Francia e DIAMOND nel Regno Unito. A questo va aggiunto che il nuovo laser a elettroni liberi FERMI, è un FEL unico al mondo, in quanto sfrutta un metodo avanzato, mai utilizzato prima, di seeding (inseminazione), cioè l'utilizzo di pacchetti di fotoni da un laser convenzionale per ottenere emissione stimolata da pacchetti di elettroni. Questo garantisce una "purezza" della radiazione generata, in termini di coerenza, controllo della lunghezza d'onda e della larghezza spettrale che non ha pari.

MOTIVAZIONE PER LO SVILUPPO

Elettra Sincrotrone Trieste lavora a stretto contatto con centri di ricerca e industrie di carattere internazionale in diversi campi quali quello della fisica dei materiali, della chimica dell'ingegneria e delle nanotecnologie ma anche delle biotecnologie. Partecipa al progetto, è la Representing Entity e ospita la sede di CERIC-ERIC (European Research Infrastructure Consortium), un'infrastruttura di ricerca distribuita di cui sono Membri 8 Stati Europei Italia, Austria, Polonia, Repubblica Ceca, Romania, Serbia, Slovenia ed Ungheria. CERIC-ERIC opera in un ampio ambito di ricerca, che va dall'analisi (mediante luce di sincrotrone, neutroni, microscopia elettronica, NMR, etc. presso le varie sedi dell'infrastruttura distribuita) alla sintesi su scala nanometrica di materiali e biomateriali. Anche CERIC-ERIC è stata inclusa dal MIUR nel PNIR approvato con Decreto ministeriale nel 2016 come una delle sole undici Infrastrutture Globali d'interesse dell'Italia. La partecipazione a questo progetto ma anche il ruolo importante in altri progetti a forte contenuto tecnico e tecnologico e collaborazioni in ambito internazionale tra i quali ESFRI (European Strategy Forum for Research Infrastructure), ELI (Extreme Light Infrastructure), ESS (European Spallation Source, in costruzione a Lund (Svezia), NFFA (Nanoscience Foundries and Fine Analysis), OPEN SESAME (Opening Synchrotron Light for Experimental Science and Applications in the Middle East) e molti altri, richiede sorgenti di luce e strumentazioni allo stato dell'arte. A questo proposito una nuova generazione di macchine di luce (ultimate storage rings) con brillanza al limite teorico è attualmente realizzabile grazie ai recenti sviluppi nella tecnologia degli acceleratori. Una macchina di questo tipo sta entrando in funzione a MaxLab (Lund, Svezia), e piani di aggiornamento in questa direzione sono in corso a ESRF (Grenoble), SOLEIL (Parigi), DIAMOND (Oxford), etc. Il mantenimento della competitività internazionale della sorgente Elettra ma anche delle linee sperimentali che utilizzano la luce prodotta, richiede l'attuazione di un analogo piano di aggiornamento il quale necessita di risorse economiche aggiuntive rispetto a quelle disponibili per la normale operatività del centro di ricerca.

Il finanziamento pubblico degli enti di ricerca e di Elettra Sincrotrone Trieste è motivato dal fatto che la ricerca, se di qualità competitiva a livello internazionale genera, in modo diffuso nella società, ma con un'importante componente nazionale e regionale, ritorni di valore economico molto maggiori della spesa, aumentando sia la competitività del sistema Italia che la qualità dei

prodotti, il loro valore aggiunto e le conseguenti entrate fiscali. Per rimanere competitivi a livello internazionale è necessario sviluppare ed aggiornare con continuità la piattaforma tecnologica, cioè la strumentazione, le tecnologie collegate ed i servizi.
Il campo specifico della micro e nano-elettronica, trarrebbe un enorme beneficio dallo sviluppo di una piattaforma, coordinata con altri partner, per la produzione e caratterizzazione di materiali per applicazioni nei dispositivi elettronici avanzati, basati anche sulle nanotecnologie. In questa piattaforma le potenzialità offerte dalla luce di sincrotrone di Elettra verrebbero utilizzate per la caratterizzazione spaziale, chimica, elettronica, e in-operando dei dispositivi, mentre gli impulsi ultracorti di FERMI fornirebbero informazioni importanti sull'eccitazione ed il trasferimento di carica elettrica, con risoluzione temporale dell'ordine del femtosecondo, per meglio comprendere processi alla base del funzionamento di dispositivi elettronici e sensori. Questo consentirebbe di produrre prototipi e dispositivi all'avanguardia con aziende esterne e centri di ricerca come, ad esempio, il CNR.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

Il budget annuale di funzionamento di Elettra e FERMI ammonta a circa 60 milioni di euro che sono sufficienti solo per garantire l'operativitá delle due macchine di luce e delle relative linee e laboratori. Gli ulteriori sviluppi essenziali per mantenere gli alti livelli di competitività ed eccellenza raggiunti fino ad ora e rendere ancor di piú il centro di ricerca punto di attrazione a livello internazionale, è di circa 200 milioni di euro.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 11

SVILUPPO DI NUOVI MATERIALI PER LA MICROELETTRONICA: IL CASO DEGLI OSSIDI AD ALTA COSTANTE DIELETTICA

L'industria microelettronica ha basato le sue fortune sul silicio, sull'abbondanza di questo elemento in natura e sulle proprietà fisiche ed elettriche del semiconduttore e dei suoi composti, primo fra tutti l'ossido di silicio. Fino a metà degli anni '80, gli elementi della tavola periodica presenti all'interno di un dispositivo microelettronico erano poco più di 10 e includevano, oltre al silicio, gli elementi utilizzati per il drogaggio del semiconduttore (sostanzialmente boro, fosforo e arsenico), l'alluminio per le metallizzazioni, azoto e ossigeno per formare nitruro e ossido di silicio, e i gas necessari ad a implementare i processi (idrogeno, fluoro, cloro e argon). La straordinaria evoluzione della microelettronica, che nel giro di 30 anni ha rivoluzionato le nostre vite, è stata possibile anche grazie all'introduzione di nuovi materiali nei processi di realizzazione dei dispositivi. Attualmente, seppure il silicio resta la materia prima principale, gli elementi utilizzati per realizzare i più moderni dispositivi microelettronici sono oltre 60, oltre metà di quelli presenti nella tavola periodica. L'evoluzione è illustrata dalla fig.45 che riporta per grandi linee la progressiva introduzione nella tecnologia CMOS di nuovi materiali.

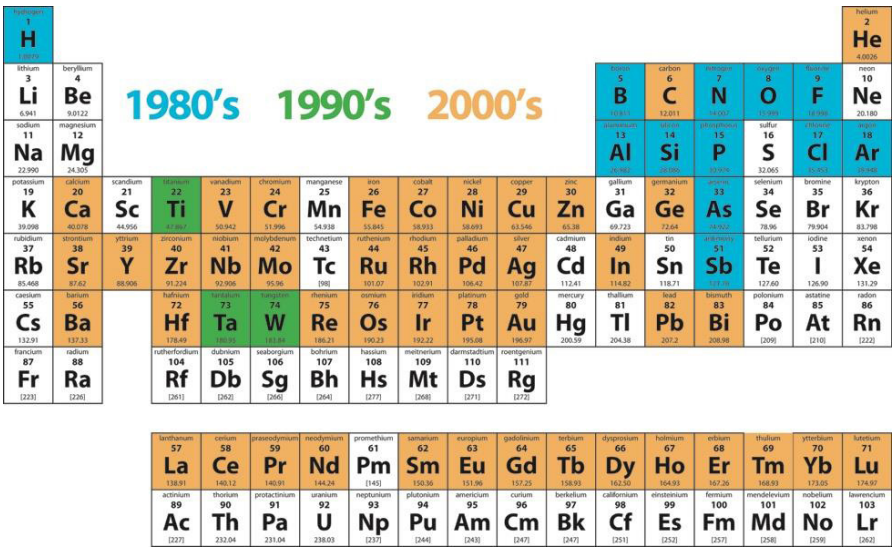


FIG. 45 L'INTRODUZIONE DI NUOVI MATERIALI NELLA TECNOLOGIA CMOS – RIELABORAZIONE DA FONTI INTEL

Questa evoluzione è avvenuta per rispondere a richieste di mercato nella direzione della miniaturizzazione, della maggiore integrazione e del miglioramento delle prestazioni dei dispositivi.

L'impatto dei nuovi materiali nella realizzazione di dispositivi sempre più piccoli ed integrati, e quindi più veloci, è illustrata nella fig.46, che mette in evidenza l'aumento di nuovi elementi introdotti nei processi di fabbricazione al progredire dei nodi tecnologici.

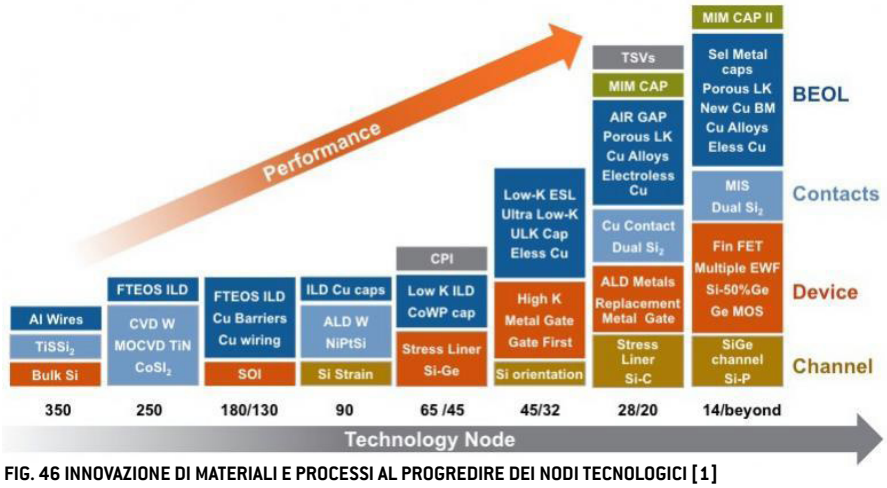


FIG. 46 INNOVAZIONE DI MATERIALI E PROCESSI AL PROGREDIRE DEI NODI TECNOLOGICI [1]

Il processo che porta un materiale dallo studio delle proprietà fisiche, chimiche ed elettroniche alla sua effettiva introduzione in un flusso di processo per la realizzazione di un dispositivo è in generale molto lungo (5-10 anni), non è sempre di successo e non è detto che segua percorsi lineari. Un contributo fondamentale all'effettiva introduzione di nuovi materiali nei dispositivi avanzati viene dalla scienza dei materiali e dai progressi degli studi nelle istituzioni di ricerca e nelle università, tanto più efficaci se portati avanti in stretta collaborazione con l'industria. Nel solco tracciato dalla International Technology Roadmap for Semiconductors [2], la ricerca di nuovi materiali in microelettronica ha visto negli anni una straordinaria convergenza di interessi tecnologici, economici e scientifici ed ha beneficiato delle attività di sviluppo pionieristiche in enti di ricerca ed università.

Tra i nuovi materiali introdotti negli ultimi 15 anni, un ruolo cruciale è stato ricoperto dagli ossidi con costante dielettrica maggiore a quella del SiO_2 (high-k). Questa classe di materiali include gli ossidi binari di alcuni elementi di transizione (soprattutto dei gruppi 3-5) e di alcune terre rare, oltre che un'ampia serie di sistemi ternari. Studiati inizialmente nella prospettiva di sostituire il SiO_2 nei nodi tecnologici al di sotto di 100 nm [3] e per essere utilizzati nelle DRAM, prima di poter essere introdotti fattivamente nei processi di fabbricazione, gli high-k sono stati oggetto di ricerche nelle maggiori istituzioni di ricerca mondiale (accademica ed industriale), che attorno a questo tema hanno sviluppato nuove conoscenze nella fisica dello stato solido, nella chimica e nell'ingegneria dei materiali. La comunità scientifica cresciuta attorno agli high-k ha un carattere interdisciplinare, mette insieme competenze di scienze fisiche e chimiche, di ingegneria dei materiali e dei sistemi, e condivide l'interesse di industrie, ricerca pubblica ed accademica. A titolo di

esempio, e certamente sottostimandone l'impatto, il grafico in fig.47 riporta il numero di pubblicazioni scientifiche nel periodo 1995-2018 che contengono nel titolo o nell'abstract il termine high-k, diventato in poco tempo patrimonio comune.

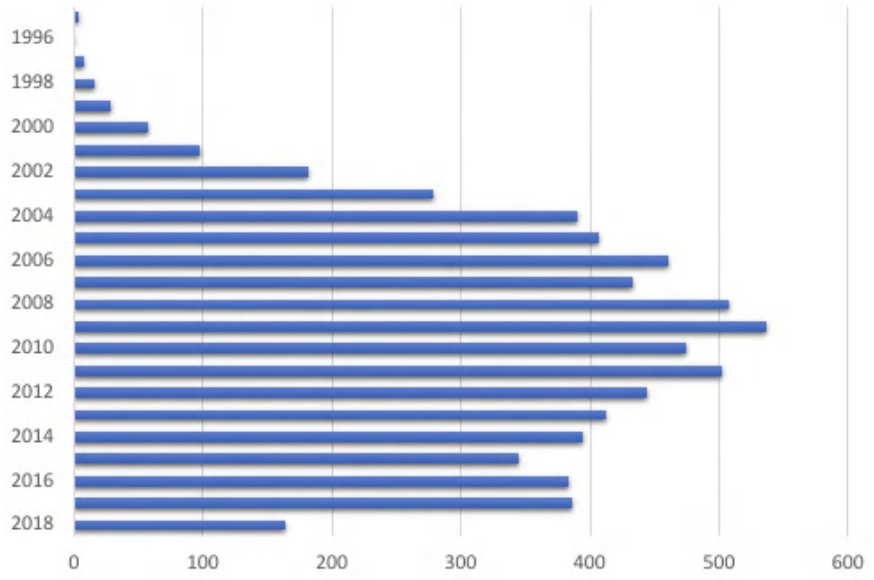


FIG. 47 NUMERO DI PUBBLICAZIONI SCIENTIFICHE CONTENENTI IL TERMINE HIGH-K NEL TITOLO O NELL'ASTRACT – FONTE ISI WEB OF SCIENCE

Considerato che il primo annuncio di sostituzione del SiO_2 con un composto a base di ossido di afnio (HfO_2) e silicio è stato annunciato da Intel nel 2007, il grafico mostra come prima durante e dopo tale data il mondo della ricerca sia stato attivo su questo argomento, alimentando di fatto il progresso tecnologico dell'industria dei dispositivi microelettronici.

Va tenuto presente che l'introduzione di un nuovo materiale nel processo di produzione mette in discussione l'intero sistema, i processi e gli altri elementi presenti nel dispositivo: per introdurre gli high-k come dielettrici attivi nei flussi di processo ad esempio è stato necessario studiare ed ottimizzare nuovi materiali per gli elettrodi e nuovi processi di passivazione, oltre che individuare nuove formule per la rimozione controllata del materiale. È stato anche necessario mettere a punto nuove tecniche di deposizione capaci di produrre film estremamente sottili di elevata uniformità composizionale e di spessore: in particolare in questo periodo ha trovato larga diffusione nell'industria microelettronica l'ALD – atomic layer deposition.

Lo studio degli high-k ha riguardato istituzioni e industrie di tutto il mondo. In Italia, grazie all'impulso di importanti industrie del settore e all'interesse in ambito europeo, la ricerca sui materiali high-k ha portato ad importanti sviluppi, anche grazie a progetti congiunti tra ricerca industriale e ricerca accademica. Il patrimonio di conoscenze sviluppate in ambito nazionale è di assoluta avanguardia e riconosciuto in ambito internazionale.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Il patrimonio di conoscenze sviluppato negli ultimi 20 anni attorno agli high-k, ai materiali ad essi collegati, nonché in generale ai processi di realizzazione di film sottili e ultrasottili con proprietà controllate, ha permesso di estenderne l'utilizzo a settori della microelettronica non previsti inizialmente. Un esempio è l'impiego di alcuni di questi ossidi come ricoprimenti passivi in MEMS e MEMS ottici, in cui si sfruttano le proprietà di barriera e le costanti ottiche del materiale [4]

L'individuazione di nuove proprietà rende alcuni high-k di interesse per lo sviluppo di nuove classi di dispositivi. Un esempio in tal senso è la scoperta delle proprietà ferroelettriche del Hf02, che apre la strada ad applicazioni nel settore delle memorie non volatili non convenzionali e nella formulazione di nuovi dispositivi a capacità negativa, di interesse per le tecnologie oltre al CMOS, come peraltro rilevato nelle ultime edizioni della ITRS [5].

Analogamente, le proprietà di commutazione resistiva di alcuni ossidi binari e ternari high- k, ovvero la capacità di cambiare in maniera reversibile lo stato da isolante a conduttivo a seguito dell'applicazione di un campo elettrico, li rende particolarmente attrattivi per la realizzazione di memorie non-volatili a commutazione resistiva (RERAM). Le proprietà di commutazione e la semplicità della struttura rende questi dispositivi particolarmente adatti alla realizzazione di architetture neuromorfiche, cioè capaci di riprodurre nella loro struttura fisica l'organizzazione del sistema nervoso tramite componenti in grado di imitare le attività di sinapsi e neuroni [6].

Lo sviluppo di tecnologie di deposizione per gli high-k capaci di produrre film a spessore e composizione controllata anche a temperature relativamente basse, compatibili con i processi di fabbricazione delle metallizzazioni (back-end), rende questi materiali particolarmente attrattivi per la realizzazione di elementi capacitivi, ad alta densità di capacità, richiesti per rispondere alla tendenza ad avere sistemi il più possibile integrati e a basso consumo.

Questi sono solo alcuni esempi di sviluppo attualmente disponibili a uno stadio di sviluppo precompetitivo (RTL 4-6). Appare quindi evidente che il filone della ricerca sui dielettrici ad alta costante dielettrica è lungi dal ritenersi esaurito ed anzi presenta interessanti aperture in settori e per funzioni non inizialmente previsti e per lo sviluppo di nuovi dispositivi.

Per mettere a frutto l'enorme patrimonio di conoscenze sugli high-k e permetterne lo sfruttamento su scala industriale occorre continuare ad alimentare la ricerca nel settore, favorendo soprattutto i progetti più applicativi che intendono portare alla fase di industrializzazione dispositivi ed architetture innovative. Questa è inevitabilmente la fase più costosa della ricerca, perché non può prescindere dall'utilizzo di attrezzature di grado industriale che permettano di indirizzare i nodi tecnologici di interesse più applicativo e di mettere in luce gli aspetti di processo da approfondire e migliorare, oltre a consentire una maggiore integrazione tra ricerca e processi industriali.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

1 milione di euro per 2 anni

RIFERMIENTI BIBLIOGRAFICI

[1] Paul McLellan, SEMI SMC: Atoms still don't scale
https://semiwiki.com/forum/sontent/5023-semi-smc-atoms-still-dont-scale.html (2015)
[2] www.itrs2.net
[3] Robert M. Wallace, Dielectric Materials for Microelectronics, in *Springer Handbook* of Electronic and Photonic Materials, S. Kasap, P. Capper (eds.), Springer International Publishing AG 2017,DOI 10.1007/978-3-319-48933-9_27.
[4] E. Cianci, A. Laperti, G. Tallarida, M. Sanuccoli, C. Fiegna, L. Lamagna, S. Losa, s. Rossini, F. Vercesi, D. Gatti, C. Wiemer, Advanced protective coating for reflectivity enhancement bu low temperature atomic layer deposition of Hfo2 on Al surfaces for micromirror application, Sensors and acuators A: Physical, 282, 2018, 124-131, http://doi.org/10.1016/j.sna.2018.9.028.
[5] Hoffmann, M., Pesic, M., Chatterjee, K., Khan, A.I., Salahuddin, S., Slesazeck, S., Schroeder, U. and Mikolajick, t. (2016), Direct Observation of Negative Capacitance in Polycrystalline Ferroelectroic HfO_2. Adv. Funct. Master., 26:8643-8649.
dai: 10.1002/adfm.201602869
[6] E. Covi, S. Brivio, A. Serb, T. Prodromakis, M. Fanciulli, S. Spiga, Analog memristive synapse in spiking networks implementing unsupervised learning. Front. Neurosci., 25 October 2016 ffl https://doi.org/10.3389/fnins.2016.00482

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 12

TECNOLOGIE PER SMART SYSTEMS: OPPORTUNITÀ PER UNA SILICON FOUNDRY EUROPEA

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

L'Europa gioca e può giocare un ruolo di primo piano nel mondo globale in settori dove le tecnologie micro-elettroniche abilitanti sono quelle proprie del More-than-Moore (MtM): settori quali l'automotive, industrial & medical, security,...

Da un punto di vista della fornitura di circuiti microelettronici, nel tempo il modello di business è cambiato e oggi, rispetto al passato in cui un'azienda faceva tutto in casa, dalla progettazione circuitale allo sviluppo su silicio e successiva vendita al cliente, si è passati ad un contesto per il quale esistono tre differenti modelli di business:

- l'azienda IDM (Integrated Device Manufacturing) che fa ancora tutto in casa;
- l'azienda fabless, che disegna i circuiti e vende i prodotti, ma si affida al altri per il loro sviluppo su silicio e produzione;
- l'azienda foundry, che, essendo proprietaria di linea produttiva, sviluppa su silicio e produce i wafers per terzi, eventualmente mettendo a disposizione anche proprie tecnologie.

Questo modello è trasversale al segmento di business, nel senso che esistono aziende dei tre tipi operanti sia nel segmento del MtM (More than Moore), che nel segmento del More-Moore.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Poichè in Europa esistono molte aziende operanti in mercati sopra citati il cui modello di business è quello di fabless, l'esistenza di foundry europee con fab presenti in Europa è un vantaggio per non avere dipendenza tecnologica da aree geografiche extra-europee. Questo è vero soprattutto per foundry che operino negli ambiti tecnologici di interesse per lo sviluppo dei prodotti delle fabless europee, con la possibilità di sviluppare tecnologie di leading edge del segmento MtM per la tipologia di applicazione di interesse.

In questo contesto l'Italia può giocare un proprio ruolo, sfruttando quanto già esistente con le potenzialità di sviluppo. In particolare, parlando di silicon foundry, la presenza di una foundry che opera su linea di silicio da 8" sia su customer technology – ovvero importando sulla propria linea di silicio una tecnologia già sviluppata dal cliente – che come open foundry – ovvero mettendo a disposizione piattaforme tecnologiche proprietarie sulla base delle quali il cliente, sia esso una società, un centro di ricerca o una Università, può sviluppare un prototipo a costi ragionevoli che, successivamente, potrà industrializzare e mettere in produzione secondo modelli schematizzabili come in Fig. 48.

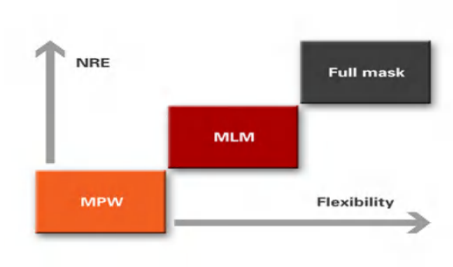


FIG. 48 MPW (MULTI PROJECT WAFER)

***Fig. 48**: la possibilità di accesso a MPW (Multi Project Wafer) e MLM (Multi Layer Mask) dà la possibilità a fabless, centri di ricerca e università di testare i loro design su silicio a costi notevolmente inferiori rispetto all'utilizzo del Full Mask Set completo.*
L'accesso al nodo tecnologico, attraverso il PDK – Process Design Kit, è fornito dalla foundry con il modello di business denominato "open foundry"

Lo sviluppo di tecnologie leading edge per stabilimenti a 8" fornisce solide piattaforme abilitanti per indirizzare le potenzialità dei settori in cui l'Europa può e deve giocare un ruolo di primo piano (vedi Fig.2 e Fig.3): da un punto di vista di nodo tecnologico, significa consolidare l'offerta tecnologica sui nodi fino da 180 nm fino a 90 nm, in modo da ottenere sistemi su chip (system on chip) più complessi, con funzionalità addizionali, combinando componenti di tipo analogico, digitale e MEMS in processi CMOS compatibili.



FIG. 49 PROCESSI E TECNOLOGIE PER I SETTORI DI SVILUPPO IN EUROPA

La dotazione, inoltre, di soluzioni tecnologiche non standard per il segmento MtM su 8", quali l'utilizzo del rame nelle piste metalliche, il Back Side Illumination nei sensori ottici e la nuova tecnologia che permette di realizzare sensori ottici di dimensioni "non standard", stitching, nei processi fotolitografici fornisce ulteriori margini di competitività.
Infine, l'ampliamento del servizio in termini di supply chain da parte della foundry, con servizi relativi al testing e back-end, può portare in Italia parti di processo, oggi forniti da soggetti terzi, dando la possibilità di generare nuove posizioni lavorative. In questo contesto esistono diversi filoni tecnologici sul quale investire per soddisfare alle richieste del mercato.

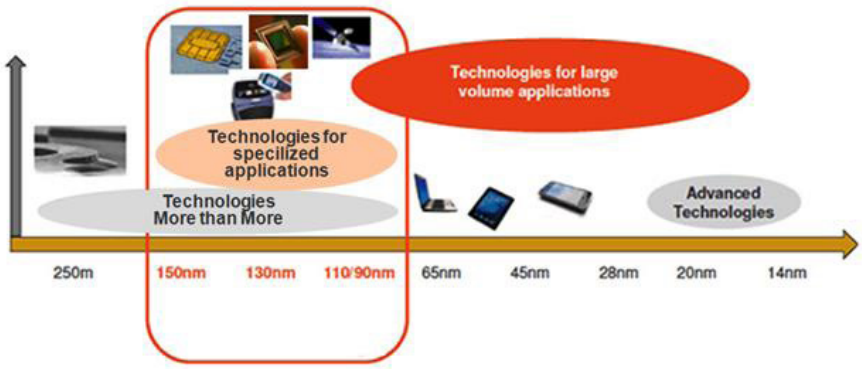


FIG. 50 IN ARANCIONE I NODI TECNOLOGICI LEADING EDGE PER GLI STABILIMENTI A 8"

Uno di questi è quello dei sensori di immagine, basati sulla tecnologia del silicio. Questo è considerato un campo di applicazione con forte crescita, principalmente guidata dalle innovazioni tecnologiche che possono essere applicate in differenti casi.
I sensori di immagine CIS (CMOS Image Sensor) classici, da una parte, e le tecnologie per sensori ottici analogici, dall'altra, stanno ampliando gli sviluppi tecnologici dedicati e in questo modo stanno costruendo un campo di utilizzo integrato.
Le tecnologie CIS, per esempio, sono avanzate nel campo della integrazione tridimensionale più di altri segmenti tecnologici, e sono state abilitanti per CIS con alte prestazioni e alta integrazione di soluzioni per system-on-chip.
D'altra parte, altre tipologie di sensori ottici, tipo i Silicon Photo Multiplier (SiPM) o gli Single Photon Avalanche Diode (SPAD), stanno ricevendo grande attenzione poiché permettono di rivelare altre proprietà di immagine, come la tridimensionalità o la rivelazione della distanza di oggetti con il Time-of-Flight (ToF). Questi dispositivi stanno trovando il loro modo per essere industrializzati su larga scala.
Queste tecnologie e applicazioni stanno aprendo differenti e ampi mercati, soddisfacendo a diversi requisiti dove la rilevazione dell'informazione ottica è necessaria. Alcuni esempi sono l'Internet delle Cose, principalmente il "machine vision", rivelatori medicali, rivelatori per esperimenti scientifici e il campo dell'automotive. Per quest'ultimo si prevede una forte crescita grazie all'introduzione della guida assistita, che richiede la necessità da parte del mezzo di "vedere" il mondo attorno in maniera automatica. È previsto che il numero di sensori ottici, tipo CIS, in dotazione ad ogni auto possa crescere di un ordine di grandezza nei prossimi anni per soddisfare alle richieste di livelli sempre maggiori di guida assistita. La dotazione di ulteriori dispositivi ottici aumenterà poi quando verrà introdotta la possibilità di avere auto a guida autonoma in larga scala.
Collegandosi agli sviluppi necessari per l'automotive, un altro ambito è quello del futuro largo impiego di auto a motore elettrico. È previsto che nel breve futuro molti paesi vadano nella direzione di forzare l'adozione di auto elettriche o ibride, per ridurre l'inquinamento locale, soprattutto nelle aree ad alta densità abitativa.

In questo caso una delle tecnologie fondamentali è quella dei dispositivi di potenza. Esistono diverse classi di dispositivi di potenza, da quelli monolitici a quelli integrati, prodotti con diversi tipi di semiconduttore, dal silicio ai III-V fino al carburo di silicio.
Una linea di sviluppo è quella di utilizzare il silicio con tecnologia CMOS ed integrare dispositivi di potenza LDMOS, in grado di sostenere alta tensione grazie all'assottigliamento del wafer, cioè con tecnologia back-side, mutuata dai sensori di immagine, grazie al Back-Side Illumination. Questa tecnologia offre vantaggi sotto diversi aspetti. Uno dei più importanti è quello di essere intrinsecamente integrabile tridimensionalmente, potendo combinare wafer prodotti con tecnologie diverse. Per esempio, si può assemblare un wafer realizzato con tecnologia CMOS da 150nm con dispositivi LDMOS back-side con un wafer realizzato con tecnologia CMOS digitale per logiche avanzate.
In questo caso un modulo tecnologico abilitante è il cosiddetto "Hybrid bonding" che permette di connettere elettricamente wafer, la cui superficie è formata da materiali di composizione diversa, tipo metallo (ad esempio rame) e dielettrico (ad esempio ossido di silicio).

STIMA RISORSE ECONOMICHE

LFoundry investe in R&D ogni anno, una cifra pari a circa 15 milioni di euro.

SETTORE 7

>TRASPORTI<

MEMBRI DEL GRUPPO DI LAVORO

Settore – Trasporti

Coordinatori	
CRF	**Maria Onida**
CNR	**Emilio Fortunato Campana**
POLITECNICO MILANO	**Laura Mazzola**
Componenti	
ANFIA AUTOMOTIVE	**Marisa Saglietto**
	Fabrizia Vigo
ASSING	**Fazio Bianco**
CENTRO RICERCHE FIAT	**Luisa Andreone**
	Andrea Pipino
	Mauro Casella
	Francesco Lilli
	Anita Fiorentino
	Maurizio Miglietta
	Vittorio Ravello
	Patrizio Turco
	Stefania Zandiri
	Enrico Pisino
ENEA	**Giuseppe Barbieri**
	Antonino Genovese
PIRELLI	**Maura Corinaldesi**
	Stefano Porro
WARRANT	**Isella Vicini**
	Massimo Rinaldi
SAPIENZA UNIROMA	**Francesco Marra**
UNIPISA	**Sergio Saponara**
CNH INDUSTRIAL	**Elena Barbero**

TECNOLOGIE PRIORITARIE - TRASPORTO STRADALE

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 1
COMBUSTIBILI

La Commissione Europea, al fine di migliorare la qualità dell'aria e ridurre gli inquinanti e la CO_2, impone limiti di emissione sempre più severi alle autovetture e ai motori e inoltre definisce specifiche di qualità più elevate per i carburanti e combustibili. A seguito di queste scelte si devono sviluppare nuove tecnologie motoristiche e nuove tecnologie formulative per i combustibili che, oltre a rispettare le nuove specifiche ed utilizzare stream da fonti rinnovabili, devono garantire le migliori prestazioni a tutti i veicoli. Questa esigenza è espressa dalle associazioni dei costruttori nel World Wide Fuel Charter[1] dove sono riportate le caratteristiche dei combustibili ritenute idonee alle varie tecnologie motoristiche presenti sul mercato.

Tecnologie per la benzina

Le Specifiche europee sulla qualità dei carburanti hanno puntato principalmente sulla riduzione delle emissioni inquinanti ponendo un limite, nel caso della benzina, sul contenuto di aromatici, benzene e zolfo. La nuova direttiva sui carburanti (FQD) pone inoltre l'accento sul controllo delle emissioni di CO_2 favorendo e incentivando l'utilizzo di composti da fonti rinnovabili da impiegare nei carburanti. La benzina è un articolato blending di componenti che deve garantire il perfetto funzionamento del motore ed una pronta risposta ai comandi dell'utente. Le nuove tecnologie motoristiche come il Controllo Elettronico delle Valvole e il Turbocharging possono avere specifiche richieste di qualità dei carburanti e questo ricade sulle tecnologie formulative e di blending dei carburanti. Lo stesso avviene quando tra i composti che compongono il blending benzina si introducono metanolo o etanolo o eteri che possono far parte delle tecnologie da fonti rinnovabili.
I nuovi componenti da fonti rinnovabili devono essere integrati nel blending e non peggiorare le emissioni e le prestazioni generali del veicolo, incluse le perdite evaporative. Il mantenimento nel tempo delle prestazioni del sistema di alimentazione e di aspirazione del motore benzina richiede lo sviluppo di una tecnologia di additivazione di pacchetti detergenti.

Tecnologie per il gasolio

Le specifiche europee sulla qualità dei carburanti hanno puntato principalmente sulla riduzione delle emissioni inquinanti in particolare quelle di particolato definendo dei limiti a parametri quali il numero di cetano, l'indice di cetano, il contenuto di IPA (idrocarburi policiclici aromatici), la densità e lo zolfo. Quest'ultimo è stato limitato a valori inferiori ai 10 ppm in quanto interferisce in

1 Worldwide Fuel Charter – Fifth Edition – September 2013 - http://www.acea.be/uploads/publications/Worldwide_Fuel_Charter_5ed_2013.pdf

modo negativo anche sui sistemi di abbattimento delle emissioni. Il basso tenore di zolfo riduce anche l'acidità dei gas ricircolati in camera di combustione dall'EGR. La nuova FQD ha riconfermato l'importanza di ridurre le emissioni allo scarico del motore abbassando il tenore di IPA dal 11% peso al 8% peso ed ha incentivato l'uso di composti da fonti rinnovabili. Questo ha portato allo sviluppo di tecnologie di idrogenazione nel settore dei combustibili di origine fossile e rinnovabile, quali HVO, e a tecnologie di trans esterificazione per quel che riguarda le sole fonti rinnovabili.
Anche per il gasolio la tecnologia formulativa e di blending è molto delicata e l'inserimento di prodotti da trans esterificazione, quali il FAME, va gestito in modo adeguato per prevenire problemi di instabilità dovuti a insaturazioni nella molecola.

Metano: Compressed Natural Gas (CNG) e Liquified Natural Gas (LNG)

Il gas naturale, metano, o il bio metano possono essere utilizzati nel settore trasporti in veicoli opportunamente adattati per l'uso di metano ed usati o come CNG (gas naturale compresso) o LNG (gas naturale liquefatto).
La tecnologia LNG è da preferire a quella CNG su Heavy Duty destinati a lunghe percorrenze poiché ha una maggiore densità energetica.
Legato a questo sviluppo tecnologico c'è poi quello legato al sistema logistico e delle stazioni di servizio che dovrebbero sviluppare delle tecnologie di stoccaggio e ri-gassificazione per fornire sia il LNG che il CNG.

Bunker fuel marina

Nelle specifiche qualitative relative ai combustibili per uso marina secondo la normativa ISO 8217:2012(E) si fa riferimento alla revisione del MARPOL Annex VI, che ha lo scopo di controllare l'inquinamento delle emissioni in atmosfera da parte delle navi, e a tal fine introduce e definisce nuovi limiti di specifica sul contenuto di zolfo sul prodotto fornito, oppure l'impiego di alternative equivalenti (adozione di scrubber sulle navi).
Nell'Aprile 2008 il comitato per la protezione marittima ambientale, (Marine Environment Protection Committee - MEPC) della Organizzazione Marittima Internazionale (International Maritime Organization - IMO), ha approvato un *amendment* all'Annex VI della Convenzione Internazionale per la prevenzione dell'inquinamento marittimo (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships - MARPOL). Tale *amendment* ha fissato limiti più severi sulle emissioni di SOx e NOx delle navi e ha aperto la possibilità di designare limiti speciali nelle aree di controllo ambientale (Environmental Control Areas - ECA) su emissioni di SOx, NOx e particolato. Sono aree SECA il Mar Baltico, il Mare del Nord e la costa Nord Americana.
Il MARPOL Annex VI rivisto ha ora fissato limiti più stringenti sul contenuto di zolfo nei bunker fuel:

- Riduzione sul valore massimo a 3,5% dal 1 Gennaio 2012, seguito da un'ulteriore riduzione allo 0.5% m/m dal 1 Gennaio 2020, a valle di uno studio di fattibilità.
- Riduzione nelle aree SECA all'1% dal 1 Luglio 2010 e ulteriore riduzione allo 0,1% dal 1 Gennaio 2015.

Secondo uno studio IMO l'uso di heavy fuel oils dovrà essere largamente abbandonato man mano che il limite di specifica sullo zolfo diminuirà sotto l'1% m/m.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

La Commissione Europea si è data un obiettivo di ottimizzare il consumo di energia rendendo obbligatorio l'uso del 20% di energia proveniente da fonti rinnovabili sostenibili sul consumo di energia complessivo della Comunità entro il 2020. Tra le quote di energia da ottimizzare c'è quella destinata ai trasporti che dovranno incamerare nei prodotti tradizionali benzina e gasolio l'uso di biocarburanti. Le direttive che direttamente coinvolgono la ricerca e la qualità dei carburanti sono la Renewable Energy Directive (RED) e la Fuel Quality Directive (FQD) emanate nel 2009. La direttiva RES (2009/28/EC) impone a partire dal 2020, la distribuzione di carburanti che contengano il 10 %, calcolato su base energetica, di componente rinnovabile. La direttiva definisce inoltre dei criteri di sostenibilità per i bio-componenti in relazione al saving sulle emissioni di gas serra che questi consentono rispetto ai componenti non rinnovabili. La riduzione di gas serra è del 35% fino al 31/12/2016; 50% dal 1/1/2017 e a partire dal 1/1/2018 per bio-componenti ottenuti da impianti costruiti dopo il 1/1/2017 è del 60%. La direttiva dà indicazioni su come calcolare questi valori ponendo l'accento sulla sostenibilità delle materie prime.

La direttiva FQD (2009/30/EC) richiede che al 31/12/2020 i carburanti trazione consentano una riduzione di gas serra del 10% rispetto alle emissioni medie da carburanti fossili calcolate al 2010. Di queste, il 6% di riduzione dovrà venire dal contenuto rinnovabile del carburante, il 2% da azioni di stoccaggio e cattura della CO_2 e da veicoli elettrici e il 2% dall'acquisto di crediti in accordo al protocollo di Kyoto.

Per rispettare gli obblighi sarà necessario garantirsi la disponibilità di bio-componenti di 2ª generazione prodotti da scarti, materiali non edibili, cellulosa, ligno-cellulosa, e alghe, il cui contributo in termini energetici viene calcolato doppio, rispetto ai bio-componenti di 1ª generazione oggi disponibili (bio etanolo, biometanolo, bio ETBE, FAME ecc.).

La diminuzione di fonti fossili e le più severe norme ambientali spingono a sviluppare tecnologie che convertano in benzina e gasolio la maggior parte di greggio lavorato. Oggi la ricerca deve essere orientata a sviluppare tecnologie per sfruttare le fonti rinnovabili da materia prima di seconda e terza generazione provenienti cioè dall'utilizzo di parti di scarto, della cellulosa e della lignina, o da altre colture quali le alghe. Queste devono essere correlate allo sviluppo di tecnologie di processo e nuove tecnologie di blending o produzione per i carburanti e combustibili.

Lo sviluppo della tecnologia dei carburanti e dei combustibili va quindi implementata a 360 gradi considerando sia le fonti fossili che quelle rinnovabili, e includendo anche quelle del metano e biometano che contribuiscono alla diversificazione delle fonti di approvvigionamento energetico.

Inoltre diversi fattori incideranno sulla futura domanda di bunker, a partire dalla crescita nel commercio mondiale, dalla decisione degli armatori di utilizzare combustibili alternativi (LNG) o dotarsi di sistemi di depurazione dei gas di scarico sulle navi (scrubbers).

Cionondimeno il quadro normativo in evoluzione risulta sfidante per l'industria petrolifera: a causa della prevista ripida caduta della domanda di prodotti derivanti dal fondo del barile è necessario incrementare la capacità di conversione e di idrogenazione dei residui, al fine di traguardare le nuove specifiche sul contenuto massimo di zolfo dei combustibili marini.

Si sta inoltre valutando la possibilità di rivedere la normativa ISO 8217 includendo anche processi "unconventional", come ad es. GTL, BTL e HVO nel pool combustibili marina, a patto che il blend

finale rispetti le specifiche. Sarà inoltre necessario tenere conto delle problematiche che le formulazioni dei nuovi combustibili porteranno con sé, prima fra tutte la diminuzione del potere lubrificante (lubricity) dovuta alla netta diminuzione dei composti solforati. Occorrerà pertanto utilizzare tipologie di oli lubrificanti studiate ad hoc e rivedere le composizioni dei chemical da additivare alla base del combustibile.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Benzina e gasolio per i prossimi anni rimarranno ancora le principali fonti di energia per il settore autotrasporti. La qualità di benzina e gasolio dovrà tener conto e incamerare una quantità di componenti da fonti rinnovabili (prima e seconda generazione) tali da rispettare le Normative europee RED e FQD. L'introduzione massiccia di prodotti da fonti rinnovabili in raffineria impatta in modo significativo sulla produzione di benzina e gasolio a specifica di legge.

Per quel che riguarda i biocombustibili i più diffusi oggi disponibili sul mercato sono etanolo e biodiesel (FAME). I maggiori produttori di etanolo sono gli USA e il Brasile, mentre l'Europa è il primo produttore di biodiesel. L'etanolo prodotto negli USA deriva principalmente dal mais, mentre quello prodotto in Brasile deriva dalla canna da zucchero. Dall'etanolo si ricava il bio-ETBE un ottimo componente benzina penalizzato rispetto all'etanolo per il costo e per la bassa % di prodotto bio presente nella sua molecola. In Europa il biodiesel è ottenuto per la maggior parte dall'olio di colza (Canola) o dall'olio di girasole[2].

Dagli oli vegetali in opportuni impianti di idrogenazione è possibile ottenere degli idrocarburi con buone caratteristiche per essere impiegati come componenti blending in gasolio e definiti HVO (Hydrogenated Vegetable Oil).

La coltivazione dei prodotti vegetali spesso è in competizione con la coltivazione di prodotti destinati all'alimentazione, ad esempio il mais è esso stesso un prodotto commestibile. Questo fa capire che l'utilizzo di queste materie prime potrebbe non essere sostenibile nel lungo periodo e quindi non si potranno usare per soddisfare le richieste della RED e della FQD.

Ecco perché è importante poter sfruttare le fonti rinnovabili definite di seconda generazione quali la cellulosa, la lignina ecc. che possono essere recuperate da scarti di lavorazione. Inoltre la coltivazione di queste piante non deve sottrarre terreno alle coltivazioni di prodotti commestibili e non deve alterare le caratteristiche idrogeologiche della zona in cui vengono coltivati. Per sfruttare i composti di seconda generazione bisogna investire nella ricerca per la coltivazione, per i processi di lavorazione e per la conversione di questi composti in combustibili.

Infine vanno implementate le tecnologie formulative e di blending al fine di produrre carburanti e combustibili adatti alle più avanzate tecnologie motoristiche.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

25 milioni di euro

2 Anselm Eisentraut – Sustainable Production of second-generation Biofuels – IEA – 2010

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 2
SISTEMI DI MOTOPROPULSIONE

A fianco della progressiva elettrificazione dei sistemi di motopropulsione con soluzioni che dovranno essere sempre più capaci di coniugare l'impatto prestazionale atteso con extra costi accettabili, l'evoluzione delle tecnologie legate ai motori a combustione interna unitamente alla maggior diffusione di sistemi di trasmissione in grado di ottimizzare la gestione della coppia alle ruote (cambi a doppia frizione con attuazione meccanica automatizzata o cambi automatici) contribuirà in un orizzonte temporale di corto-medio termine al raggiungimento dei target comunitari relativi alla riduzione dei gas a effetto serra.
I principali assi di sviluppo saranno declinati attorno alle seguenti tecnologie:

Propulsori ad accensione comandata a benzina ad elevata efficienza
Grazie alle sue caratteristiche di comfort, potenza e basse emissioni acustiche e grazie anche alle ridotte emissioni di gas inquinanti ottenibili con la tecnologia dei catalizzatori a tre vie, consolidata e disponibile a costi competitivi, il motore ad accensione comandata a benzina continuerà ad essere ampiamente presente sul mercato nei prossimi anni. Le tecnologie in grado di migliorarne il rendimento e diminuirne il consumo specifico saranno basate principalmente su:

- l'ottimizzazione del rapporto di compressione e ricircolo dei gas di scarico (EGR) per mantenere la dosatura stechiometrica della miscela aria/benzina (e quindi diminuire il consumo) specie in condizioni di guida reale (utilizzo "Real Life")
- l'integrazione di dispositivi efficienti di sovralimentazione (meccanica ed eventualmente in combinazione con compressori elettrici) al fine di incrementare la coppia del motore ai bassi regimi
- la disattivazione dei cilindri, di particolare utilità per un'ulteriore riduzione dei consumi ai carichi parziali
- l'evoluzione dei sistemi di iniezione: si prevede una più ampia diffusione degli impianti a iniezione diretta di benzina al fine di garantire una più elevata resistenza alla detonazione del motore ed un maggior controllo del processo di combustione capace di ridurre la formazione di particolato.

Propulsori Diesel a bassissime emissioni
L'inseverimento dell'attuale normativa Euro6 comporterà l'entrata in vigore di un nuovo ciclo omologativo (WLTP – Worldwide Light duty Test Procedure) affiancato da un'estensione del controllo delle emissioni inquinanti anche in condizioni di guida reale - Real Driving Emissions, rendendo particolarmente impegnativo lo sviluppo delle future motorizzazioni Diesel nell'ottica di un conte-

nimento delle emissioni di NOx senza penalizzare le emissioni di CO_2.
In questa prospettiva sarà fondamentale l'evoluzione della tecnologia di post-trattamento dei gas di scarico per massimizzare l'efficienza di abbattimento degli inquinanti contenendone, allo stesso tempo, i costi variabili e di esercizio, utilizzando soluzioni innovative quali, ad esempio, l'integrazione del catalizzatore SCR nel DPF (Diesel Particulate Filter) con l'iniezione di Urea e l'utilizzo di un SCR passivo in abbinamento al sistema NSC (NOx Storage Catalyst).
Tale sviluppo sarà accompagnato in parallelo dall'evoluzione delle tecnologie più dedicate al miglioramento del motore Diesel, in particolare focalizzandosi sui seguenti aspetti:

- aumento della pressione di iniezione in camera
- ottimizzazione del design della camera di combustione per massimizzare il rendimento termodinamico del ciclo contenendo, allo stesso tempo, la formazione di NOx
- sviluppo di nuovi materiali e lubrificanti per la riduzione dei fenomeni di attrito
- miglioramento del comportamento motore in termini di rumorosità e vibrazioni, con l'obiettivo di ridurre l'inquinamento acustico e migliorare la Sound Quality percepita dal cliente.

Motorizzazioni con alimentazione a metano

Il metano per autotrazione ha conosciuto, nel corso degli ultimi anni, una stagione di significativo sviluppo grazie al crescente numero di modelli immessi sul mercato da parte dei costruttori automobilistici, all'aumento, seppur graduale, degli impianti di distribuzione e al riconoscimento, da parte delle Autorità nazionali che ne hanno promosso la diffusione, come elemento strategico nel mix energetico nazionale, grazie alle sue proprietà ecologiche, al potenziale di riduzione di emissioni della CO_2 e degli agenti inquinanti oltre che alla ridotta rumorosità dei propulsori rispetto alle omologhe versioni Diesel. Il metano, infatti, abbinato a motorizzazioni ottimizzate per tale applicazione, è attualmente la soluzione più immediata ed efficace già disponibile sul mercato in quanto, oltre ad essere un combustibile sicuro ed economico, risulta particolarmente interessante perché permette una riduzione di emissioni di CO_2 di circa il 23% rispetto alla benzina ma con vantaggi anche in termini di minimizzazione del particolato, degli idrocarburi più reattivi, degli NOx e delle emissioni acustiche. Inoltre, il metano, grazie alla stabilità della sua molecola, non tende a formare composti tossici con le altre sostanze nocive presenti nell'atmosfera.
Il metano ha pertanto un ruolo strategico nel porre le basi tecnologiche per lo sviluppo e la diffusione di soluzioni ecologicamente ancora più sostenibili basate sull'utilizzo delle fonti rinnovabili: in quest'ottica il biometano, prodotto per digestione anaerobica di composti organici o per gassificazione termica di biomasse, si presenta oggi come un candidato importante per consentire di raggiungere l'obiettivo della quota prevista per il settore trasporti del 10% di combustibili da fonte rinnovabile entro il 2020, come previsto dalla Direttiva 2009/28/EC sulle Fonti Rinnovabili. Il biometano, infatti, derivato dalla produzione di biogas ed opportunamente purificato, è un combustibile totalmente sostituibile al suo omologo di origine fossile risultando equivalente in termini di composizione finale ed offrendo, per questo, un'estrema flessibilità di gestione.
Per tutti i propulsori elencati, l'ibridizzazione elettrica (da stop&start a 12 V fino a full hybrid e plug-in HEV ad elevata tensione) aprirà nuove prospettive. L'accoppiamento tra motore a combustione interna e propulsori elettrici, grazie alla loro complementarità, permetterà di ottimizzare la

gestione energetica a bordo veicolo e stimolerà lo sviluppo di nuove motorizzazioni termiche dedicate all'impiego su powertrain ibridi.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

La gestione dei cambiamenti climatici e dei suoi effetti sul nostro pianeta è oggi una delle sfide globali più complesse da affrontare: nella comunità scientifica e nell'opinione pubblica cresce la consapevolezza dei cambiamenti climatici in atto e dell'incidenza che l'aumento dei gas a effetto serra (GHG, Green House Gases) in atmosfera esercita sul clima. Il progressivo aumento delle emissioni di CO_2 causato dalle attività dell'uomo ha indotto molti governi a mettere in atto misure di regolamentazione e di controllo al fine di limitarne gli effetti negativi.

D'altro canto, i trasporti sono fondamentali per la nostra economia e la mobilità svolge un ruolo vitale per il mercato interno e per garantire ai cittadini la libertà di viaggiare: i trasporti sono funzionali alla crescita economica e all'occupazione e devono essere sostenibili in vista delle nuove sfide che si presenteranno negli anni futuri, quando si ridurrà la disponibilità di petrolio e le fonti di approvvigionamento saranno meno sicure.

In questo contesto, il futuro del motore termico potrà essere garantito grazie ad una ricerca in grado di migliorarne la competitività, l'efficienza e la sostenibilità, anche attraverso un'approfondita analisi dei seguenti temi:

- lo scenario energetico del futuro, indicando una previsione del costo e della disponibilità del petrolio;
- le prospettive per una più ampia diffusione dei combustibili alternativi, inclusi i biocombustibili avanzati di seconda generazione;
- la realizzazione di nuove infrastrutture di distribuzione e la possibilità di produrre specifici biocombustibili in loco;
- il già menzionato processo di progressiva elettrificazione del motopropulsore e del veicolo, che, per le applicazioni plug-in (ibride e puro elettriche), richiederà ingenti investimenti per supportare la realizzazione di una rete per la ricarica elettrica standard e veloce in aree pubbliche e per incrementare la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili.

Questa evoluzione del mercato toccherà tutti i segmenti nel mondo dei trasporti e dovrà tenere conto delle numerose esigenze legate ai diversi profili di missione che richiederanno diversi valori di autonomia.

I veicoli con motori a combustione interna tradizionali continueranno pertanto a svolgere un ruolo fondamentale, nel breve e medio termine, per i trasporti sia di passeggeri sia di merci, se in grado di dimostrare un significativo miglioramento in termini di prestazioni e una forte riduzione delle emissioni, ad un costo competitivo.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

In base ai dati forniti dai rapporti del TERM (*Transport and Environment Reporting Mechanism*) dell'EEA (Agenzia Europea per L'ambiente) emerge l'importanza del settore del trasporto stradale sia per quanto riguarda il movimento di passeggeri sia il trasporto delle merci: per il primo il

mezzo più utilizzato è l'automobile (84%), seguita da autobus (9%) e ferrovia (7%). Riguardo al trasporto merci, il trasporto su strada riveste una quota pari al 77%, seguito da quello su rotaia (17%) e dalle via d'acqua interne (6%).
Considerando il trend di evoluzione previsto nel medio-lungo termine, che prevede uno sviluppo importante della domanda legata al settore del trasporto/distribuzione delle merci, appare essenziale assicurare lo sviluppo di tecnologie che contribuiscano, da un lato, a valorizzare un maggior quantitativo di fonti energetiche rinnovabili e alternative al petrolio e, dall'altro, a proporre sistemi di motopropulsione altamente efficienti.
In base allo stesso studio, i *trasporti* contribuiscono alle emissioni totali di NOx, CO, PM2.5, PM10, SOx e VOC rispettivamente per il 58%, 30%, 27%, 22%, 21% e 18%. Il focus dell'evoluzione tecnologica dei sistemi di motopropulsione, sotto la guida dell'evoluzione normativa, si concentra maggiormente sulla riduzione delle emissioni gassose di ossidi di azoto (obiettivo principale dello standard Euro 6). In particolare, le motorizzazioni Diesel dovranno far ricorso a sistemi di post-trattamento dei gas di scarico sofisticati e costosi, capaci di garantire la corretta riduzione degli NOx sull'intero campo di funzionamento motore. Questo comporterà un'attenta valutazione delle scelte tecnologiche in funzione della taglia e del profilo di missione del veicolo considerato e potrà decretare, in futuro, una diversa ripartizione delle quote di mercato tra motorizzazioni Diesel e benzina.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

50 milioni di euro

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 3
SICUREZZA INTEGRATA

L'obiettivo deve tendere alla "vision zero", ovvero alla progressiva riduzione fino all'annullamento del numero di morti e feriti gravi legati a incidenti stradali, prevedendo interventi sinergici ed integrati sul sistema veicolo-guidatore- *infrastruttura stradale,* in termini di:

- riduzione e mitigazione dei danni in caso di incidente (sicurezza passiva);
- prevenzione delle situazioni di rischio di incidente (sicurezza preventiva);
- controllo attivo del veicolo (sicurezza attiva);
- ottimizzazione dei soccorsi (sicurezza terziaria).

Le aree considerate riguardano i seguenti principali aspetti complementari:

- Interventi sul veicolo e sui suoi sistemi, sul guidatore e sull'infrastruttura.
- Sviluppo di soluzioni cooperative, basate sulla comunicazione veicolo–veicolo e infrastruttura–veicolo.

Per quanto riguarda la prima area, lo sviluppo tecnologico e metodologico interessa la struttura del veicolo, i suoi sistemi di ritenuta, la biomeccanica degli occupanti, l'analisi e ricostruzione degli incidenti ed infine l'ambito del Testing sia reale (cioè le prove sperimentali) che virtuale (il CAE ovvero la simulazione numerica).

Struttura del veicolo

In ambito struttura veicolo i principali interventi riguardano:

- Sistemi di sicurezza passiva e definizione di nuovi piani di validazione e crash test per veicoli elettrici con componenti ad alta tensione.
- Miglioramento della struttura veicolo e dei sistemi di protezione degli occupanti in urti non convenzionali in accordo con gli attesi trend evolutivi.
- Miglioramento della compatibilità in urto frontale e laterale tra veicoli, attraverso architetture che favoriscano l'allineamento dei principali componenti strutturali preposti alla dissipazione dell'energia sviluppata durante gli impatti e come conseguenza della definizione di appropriati metodi di misura/valutazione della compatibilità, vale a dire nuovi crash test di riferimento e/o metriche di valutazione degli output misurabili sperimentalmente.
- Ottimizzazione e armonizzazione delle procedure di prove e rating world wide, per una progettazione orientata .
- Valutazione delle prestazioni di sicurezza, nelle varie configurazioni di urto di riferimento e per veicoli tradizionali e con propulsioni alternative, dei componenti realizzati con materiali

innovativi in ottica di alleggerimento. Ad esempio utilizzo di materiali innovativi con migliorate caratteristiche di assorbimento energetico ed in grado di garantire che la prestazione in urto, testata sperimentalmente, non degradi nel tempo.

Sistemi di ritenuta

Per i sistemi di ritenuta i principali includono:

- Miglioramento della sicurezza degli occupanti (far side) e ottimizzazione dei dispositivi di ritenuta (airbag, pretensionatore attivo, limitatore di carico, etc.)
- Sviluppo della *Sensoristica Crash* e strategie di controllo post crash.
- Nuove tipologie di airbag, caratterizzati da strategie di gonfiaggio più controllabili ed adattabili al tipo di occupante.
- Nuovi sistemi di rilevamento della posizione e tipologia degli occupanti in abitacolo, per gestione ottimale e personalizzata della prestazione di ritenuta (sempre verso sistemi di ritenuta 'intelligenti' capaci di interventi differenziati in funzione del grado di severità e della tipologia di urto, nonché delle caratteristiche antropometriche e posturali degli occupanti, ovvero sistemi di ritenuta specifici ed adattativi per particolari categorie di occupanti quali bambini, anziani, disabili).

Biomeccanica

Per le tematiche inerenti gli aspetti di biomeccanica si evidenzia in particolare:

- lo sviluppo di nuovi manichini per occupanti adulti e bambini, armonizzati (per uso worldwide) e con aumentata biofedeltà. I modelli di corpo umano (HBM) hanno il potenziale per fornire gli input per la progettazione e la valutazione dei futuri sistemi di protezione. Al riguardo sarà necessario un lavoro sperimentale biologico per collegare il danno iniziale con le conseguenze a lungo termine; nonché dati dettagliati sugli incidenti per la ricostruzione degli stessi e per stabilirne la lesività.
- Impattori evoluti per urto pedone, con maggiore biofedeltà della risposta (ad es. legform flessibile con aggiunta di una upper body mass, headform con porzione di collo o massa equivalente aggiunta, etc.).
- Nuovi manichini per urto pedone (standing pedestrian dummies, articulated dummies).
- Modelli numerici di corpo umano (human body models, vedi anche parte di testing virtuale).
- Librerie di manichini virtuali biofedeli, rappresentativi di differenti tipologie di occupanti (bambini, anziani, ...)

Analisi e ricostruzione degli incidenti:

L'analisi statistica degli incidenti (scenari, modalità, dinamiche dei veicoli coinvolti, ...), costituisce un fondamentale tassello e input di partenza per la definizione degli sviluppi dei sistemi veicolo. In particolare l'analisi è focalizzata sui seguenti principali aspetti:

- Metodi di analisi di database incidentologici per la messa a punto degli scenari di testing per i sistemi a crescente automazione e per prestazioni di sicurezza passiva. Un approccio basato sullo scenario è rilevante per la valutazione della sicurezza dei sistemi sviluppati.

Pertanto devono essere forniti scenari che coprano livelli di sistemi di trasporto più complessi in cui la sicurezza può essere descritta in termini di rischio e probabilità dovuti all'interazione tra le forze trainanti della società e della tecnologia, nonché le diverse esigenze degli stakeholder e degli utenti.

Studio della dinamica degli incidenti con particolare attenzione a:

- Incidenti che coinvolgono i Vulnerable Road Users (pedoni, ciclisti, motociclisti, ...).
- Incidenti agli incroci stradali.
- Incidenti "secondari", gli incidenti che avvengono dopo il primo urto che ha causato l'incidente, finalizzati a individuare quali soluzioni debbano essere adottate per minimizzarne gli effetti.

Testing

Per le fasi di test e validazione si evidenzia in particolare:

- Validazioni virtuali a supporto delle validazioni su vettura come mezzo per conseguire omologazioni e/o assegnare dei rating.
- Utilizzo del dato sperimentale per valutare e calibrare il livello di predittività della simulazione numerica, con associato sviluppo di opportuni criteri di correlazione/metriche/standard internazionali che consentano un'oggettiva comparazione numerico-sperimentale nella fase di verifica e validazione dei modelli numerici da usare per il testing virtuale.
- Miglioramento delle procedure di testing reale, grazie ad una forte integrazione con il testing virtuale e lo sviluppo di simulatori di guida, in modo da testare sistemi di ausilio alla guida in condizioni di sicurezza. Modellazione dei sensori, delle logiche di attuazione e controllo; calibrazione dei modello con dati reali, modellazione dell'interazione veicolo-strada, a partire dalla stima puntuale dell'aderenza ruota strada.
- Sperimentazione in aree dedicate di prova rappresentative dell'ambito urbano, extraurbano e autostradale, delle funzionalità e delle performance dei sistemi a crescente automazione.

Sistemi di ausilio alla guida

Nel prossimo decennio si prevede un aumento drastico del numero di veicoli automatizzati. Inizialmente i veicoli automatici saranno utilizzati solo in aree confinate o solo su autostrade, quindi, la tecnologia si svilupperà ulteriormente per consentire l'uso di veicoli automatizzati anche nelle aree urbane e la quota di veicoli automatizzati nel traffico urbano inizierà a crescere.
Circa lo sviluppo e l'introduzione dei nuovi sistemi di ausilio alla guida (Advanced Driver Assistance Systems) sono di seguito elencati le principali tematiche prioritarie.
Sviluppo di sensori innovativi (radar, lidar, visione artificiale, ecc.), capaci di monitorare l'ambiente esterno e di riconoscere precocemente una criticità, anche in scenari complessi quali ad esempio quello di traffico urbano, inviando informazioni di preallerta al guidatore e dati utili ai sistemi presenti sul veicolo di controllo attivo del veicolo (es. per freno e sterzo) o di mitigazione dell'urto.
Studio e sviluppo di sistemi per il monitoraggio dello stato del guidatore: grado di attenzione/distrazione, affaticamento/sonnolenza, livello di stress, parametri biomedici.

Studio e sviluppo di modelli comportamentali del guidatore nelle normali situazioni di guida (naturalistic driving), finalizzati alla ottimizzazione dei benefici possibili delle soluzioni tecnologiche sviluppate e per la personalizzazione, laddove opportuno, dei sistemi di sicurezza preventiva.
Sviluppo di sistemi di ausilio alla guida in grado di prevenire e gestire situazioni critiche, agendo autonomamente in caso di azione tardiva o inefficace del guidatore.
Studio dell'interazione tra sistemi a crescente automazione per migliorarne l'efficienza, la facilità di utilizzo e l'accettabilità.
Sviluppo di modelli comportamentali delle azioni/reazioni guidatore in situazioni critiche di guida attraverso simulatori di guida (laboratori di realtà virtuale) per il monitoraggio dello stato del guidatore e la misura del cosiddetto carico cognitivo durante la guida.
Sistemi di ausilio alla guida per atti a evitare le collisioni, con particolare attenzione a:

- Protezione dei Vulnerable Road Users (pedoni, ciclisti, ...).
- Approccio e svolte alle intersezioni stradali.
- Manovre evasive con cambio di traiettorie.
- Incidenti "secondari", gli incidenti che avvengono dopo il primo urto che ha causato l'incidente, finalizzati a individuare quali soluzioni debbano essere adottate per minimizzarne gli effetti.
- Studio dell'impatto che le nuove soluzioni tecnologiche possono avere sulla mobilità sul traffico e sulla sicurezza stradale, con l'obiettivo di accelerare la penetrazione sui veicoli circolanti delle soluzioni maggiormente efficaci o con un elevato rapporto benefici/costi.
- Sviluppo di soluzioni ad elevata automazione di guida, finalizzate a ridurre la fatica, incrementare il comfort, ma garantendo una costante attenzione del guidatore e una pronta risposta a situazioni di emergenza.
- Studio di architetture veicolo ad elevata sicurezza intrinseca sfruttando le libertà e le potenzialità di layout offerte dalla tecnologia by-wire, che prevede l'adozione di attuatori elettrici a controllo elettronico anche per i comandi primari (sterzo, freni), sostituendo quindi le connessioni di natura meccanica con cablaggi e reti elettriche.

Soluzioni di connettività

L'aumento dei livelli di automazione richiede maggiore affidabilità dei componenti e dei sistemi critici del veicolo. Nella emergente tendenza della comunicazione V2X è necessario fornire sistemi a bordo veicolo che garantiscano un sicuro compito di guida anche in caso di guasto del sistemi di controllo o perdita di comunicazione in situazioni di traffico complesse.
Per quanto riguarda lo sviluppo di soluzioni di connettività, occorre affrontare in particolare i seguenti temi:

- Sviluppo di soluzioni atte a agevolare il rilevamento di Vulnerable road user (pedone, ciclista, motociclista, ...) e la relativa comunicazione con la vettura-infrastruttura (V2X for safety), al fine di identificarne anzitempo la presenza e posizione rispetto al veicolo in transito o in manovra.
- Sviluppo di servizi V2X di navigazione a maggior livello di sicurezza, anche mediante mappe aggiornate dinamicamente con informazioni dettaglio circa la strada, la segnaletica, le con-

dizioni di traffico o la presenza di eventuali pericoli, delle condizioni di aderenza, meteo e di visibilità, etc.
- Sviluppo di servizi di e-call avanzati, per l'ottimizzazione dei soccorsi post incidente.
- Sviluppo e validazione di nuove tecnologie per la comunicazione veicolo-infrastruttura e veicolo-veicolo (standard, protocolli, architetture) con tempi di latenza e bande di trasmissioni dati compatibili con i requisiti dei sistemi di sicurezza (es. 5G).
- Soluzioni per la localizzazione relativa precisa dei veicoli rispetto al contesto di guida.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Il numero di incidenti stradali mortali e lesioni occorsi in Europa negli ultimi decenni è stato molto positivo. I dati del rapporto Eurostat "Statistiche sulla sicurezza stradale a livello regionale" hanno evidenziato una riduzione del 45% delle vittime di incidenti stradali nell'UE-28 nel periodo 2005-2015. Tuttavia, il declino degli incidenti mortali è rallentato dal 2014, con un conseguente aumento del divario rispetto all'obiettivo a lungo termine per il 2020. I rapporti di alcune autorità stradali nazionali confermano anche che la riduzione degli incidenti mortali ha subito un rallentamento o un'inversione anche per il 2016.

Il rapporto dell'European European Transport Safety Council (ETSC)include anche dati sugli utenti della strada gravemente feriti nell'UE 24. Il paragone completo non è possibile in quanto le definizioni variano nel tempo e i paesi usano definizioni diverse sugli infortuni, ma vi è un chiaro segnale anche riguardo ai feriti gravi e il trend di riduzione si è fermato. Allo stesso tempo, si può prevedere che l'aumento previsto nell'uso della bicicletta e a piedi e l'introduzione di veicoli piccoli e innovativi introdurranno nuovi modelli di incidenti e infortuni.

Se ciò continuerà negli anni a venire, sarà una delle principali preoccupazioni per l'obiettivo prossimo allo zero sulla sicurezza stradale, recentemente espresso nella dichiarazione di Malta sulla sicurezza stradale nel maggio 2017, nonché l'ambizione nello sviluppo sostenibile degli obiettivi delle Nazioni Unite. La sofferenza e il costo delle lesioni stradali rischiano di raggiungere livelli inaccettabili, pertanto risulta necessario trovare nuovi modi per integrare le misure di sicurezza nello sviluppo della società, in particolare le città intelligenti e vivibili e gli efficienti sistemi di trasporto automatizzati e connessi.

Al fine di comprendere le future esigenze di sicurezza nel trasporto su strada, è importante conoscere gli scenari degli incidenti e le vittime che gli attuali sistemi di sicurezza non sono ancora in grado di evitare/mitigare. Inoltre, il sistema del traffico sta cambiando con l'aumento dell'automazione e della comunicazione e così anche gli scenari rilevanti per la sicurezza. Tali scenari non sono ancora stati raccolti nei database degli incidenti e i metodi tradizionali di analisi delle banche dati sugli incidenti non tengono conto dell'impatto dei nuovi sistemi e l'introduzione di nuove tecnologie sulla sicurezza stradale.

La necessità di ridurre drasticamente gli incidenti stradali o di limitarne le loro conseguenze richiede un approccio integrato, tra i sistemi veicolo (sicurezza preventiva, attiva, passiva, terziaria e cooperativa) e tra veicolo, guidatore e infrastruttura stradale, il ricorso a diverse tecnologie innovative e complessi sviluppi interdisciplinari.

L'avvento di sistemi automatici connessi e a crescente automazione consente di apportare signi-

ficativi contributi al miglioramento della sicurezza attiva e preventiva, anche se apre a nuove problematiche di ricerca nell'ambito della sicurezza passiva, poiché di fatto si viene a modificare la posizione di guida e la stessa modalità di guida.
Ciò determina la necessità di nuove risposte architetturali e tecnologiche per le strutture ed i sistemi di ritenuta (o protezione) nei confronti di un potenziale impatto, per i quali sono in sviluppo soluzioni atte a minimizzare le conseguenze degli urti (sensori di pre-crash per la predisposizione all'intervento dei dispositivi, sistemi di ritenuta ad azione differenziata in funzione della severità dell'urto e delle caratteristiche antropometriche e posturali degli occupanti ecc.).
Il livello di sicurezza complessiva garantito dallo sviluppo e dall'applicazione sul veicolo di tutti i dispositivi precedentemente descritti, ivi compresi tutti quelli rivolti all'incremento della sicurezza attiva e preventiva, può essere ulteriormente accresciuto da un opportuno scambio informativo che realizzi una comunicazione tra veicolo/veicolo e veicolo/infrastruttura, concepiti come sorgenti e destinatari di informazioni da ridistribuire opportunamente.

Benefici in caso di successo:

- sul piano economico: rafforzamento sul mercato della componentistica (sensori, attuatori. sistemi di ritenuta, sedili, ...) e dell'azienda automobilistica nazionale, basato sull'innovazione di prodotto;
- sul contesto ambientale e sul piano sociale: riduzione del numero di morti o di feriti con danni permanenti in conseguenze agli incidenti stradali, e riduzione dell' impatto ambientale causato dagli incidenti. In Italia, il danno complessivo è valutato in oltre 8 miliardi di euro l'anno;
- sull'occupazione: incremento dell'occupazione con particolare riferimento ai settori della componentistica ad elevata tecnologia.

I risultati della ricerca forniranno una base per future politiche e misure efficaci che influenzeranno il comportamento degli utenti della strada e contribuiranno allo sviluppo sostenibile della cultura del traffico orientata alla sicurezza e quindi al miglioramento duraturo della sicurezza stradale.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

La sicurezza stradale è fondamentale per affrontare le sfide sociali identificate dalla Commissione europea e collegate a problemi comportamentali. Al fine di ricercare nuovi approcci per influenzare il comportamento degli utenti della strada verso una migliore sicurezza del traffico, attualmente vengono fatti sforzi in tutto il mondo per integrare le iniziative sulla sicurezza stradale in una prospettiva culturale. Valutare le culture di sicurezza in diversi sistemi, gruppi e istituzioni nazionali, regionali o locali e in relazione alle tendenze tecnologiche e sociali aiuta a comprendere i diversi modelli di percezione del rischio e assunzione di rischio e porterà a contromisure ugualmente diversificate in base alle peculiarità culturali di ciascun sistema, gruppo o istituzione considerata.
Durante l'ultimo decennio, l'attenzione per la ricerca e lo sviluppo è stata focalizzata sulla sicurezza attiva, ovvero sui sistemi di prevenzione degli incidenti. Questo lavoro è stato il primo passo

verso i veicoli a guida automatica con automazione completa. Diversi sistemi di sicurezza attivi come l'Emergency Emergency Braking (AEB), il Lane Keep Assist (LKA) e il Blind Spot Detection (BLISD) hanno già raggiunto il mercato, principalmente su auto premium. Esperti indipendenti hanno analizzato questi sistemi e l'impatto sulla sicurezza stradale. Finora non vi è alcuna prova del miglioramento della sicurezza nei dati relativi agli incidenti; ciò dipende dal breve tempo in cui i sistemi sono stati disponibili e dal fatto che la penetrazione del mercato è stata bassa.
I sistemi per l'automazione della guida, se sviluppati con elevata consapevolezza di sicurezza, se implementati completamente sulle autostrade e nel traffico misto, potranno avere un impatto importante sul miglioramento della sicurezza stradale oltre a sostenibilità, comfort, ecc. Questa ipotesi si basa sul fatto che la parte di errore umano è considerata pari al 90% nel caso di incidenti stradali; perciò aumentando l'automazione dei veicoli, la riduzione del bisogno di intervento umano dovrebbe ridurre il rischio di incidenti. D'altro canto, la piena automazione richiederà tempi lunghi poiché i sistemi sono complessi e richiedono un ampio tempo di sviluppo e di convalida.
L'industria automobilistica nazionale possiede ottime conoscenze in termini di analisi, simulazione, progettazione delle strutture per l'assorbimento dell'energia in caso di urto, e buona capacità di integrazione verso la sicurezza dei diversi sistemi ad essa afferenti (sistemi di ritenuta, sensori anticollisione, sistemi attivi di controllo del veicolo e di ausilio e supporto alla guida e alle manovre, es. sistemi di ausilio al parcheggio, di mantenimento corsia, di frenata di emergenza, ecc.).
A livello europeo alcune aziende automobilistiche (es. Volvo, VW, Daimler, BMW) stanno esplicitamente utilizzando la sicurezza come caratteristica distintiva del prodotto, anticipando soluzioni innovative, in quanto supportati da centri eccellenti di ricerca e dalla componentistica. Tutte le principali industrie automobilistiche europee sono stimolate ad impegnarsi nella ricerca sulla sicurezza, sino ad occupare un ruolo dominante a livello mondiale in tale settore.
L'industria italiana ha partecipato attivamente fin dallo sviluppo del pionieristico programma PROMETHEUS (*Program for a European Traffic with Highest Efficiency and Unprecedented Safety*) ed in molti progetti del V Programma Quadro. Si è avuta una consistente presenza nei progetti del VI e VII Programma Quadro.
In particolare si segnalano di seguito alcuni dei programmi e progetti europei integrati in tale ambito che hanno visto un'attiva partecipazione dell'industria italiana con ruoli anche di leadership:

- *PREVENT* (Preventive and Active Safety Applications- sviluppo di sistemi integrati)
- *GST* (Global System for Telematics)
- *APROSYS* (Advanced PROtection Systems)
- *INTERACTIVE* (per lo sviluppo di soluzioni per il supporto alla guida)
- *EUROFOT* (valutazione obiettiva dell'impatto dei sistemi di ausilio alla guida sulla sicurezza stradale)
- *ARTRAC* (sviluppo di nuovi sensori radar a basso costo per il rilievo di pedoni)
- *ADAPTIVE* (sviluppo di sistemi a parziale guida automatica)
- *SENIOR* (sviluppo soluzioni, procedure di prova e modelli di manichini, con particolare riguardo all'utenza anziana)
- *MEBESAFE* (sviluppo di soluzioni "nudging & caching" per indurre comportamenti semi automatici nel guidatore, con relativa predisposizione dell'Interfaccia utente)

- L3 Pilot (sperimentazione su strada di livelli di automazione 3 con piccole flotte di veicoli
- *C-ROADS* (sperimentazione di soluzioni di connettività in ottica safety e comunicazione V2x)
- *ROBUST SENSE* (sviluppo di sensoristica e tecniche di ricostruzione dello scenario per la guida automatica)
- *IN-DRIVE* (tecniche di localizzazione precisa del veicolo nella corsia e navigazione satellitare).

Notevole anche lo sforzo di contribuire alla definizione delle Roadmap di ricerca strategiche a livello europeo, in particolare in relazione alle sfide tecnologiche che occorre affrontare nell'evoluzione verso i sistemi di autonomous driving. L'Italia partecipa a tutti i gruppi di lavoro della piattaforma tecnologica *ERTRAC* (European Road Transport Research Advisory Council).

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

90 milioni di euro

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 4

MATERIALI INNOVATIVI

Qualsiasi sia il tipo di propulsione e il tipo di vettore per il trasporto, qualsiasi incremento di efficienza nello sfruttamento dell'energia primaria, sintetizzato molto spesso con l'acronimo anglosassone WTW (*Well To Whell* ovvero efficienza dal pozzo alla ruota), passa *dall'alleggerimento dei vettori* per il trasporto allo *sviluppo delle tecnologie di produzione* ad esso correlate.

L'obiettivo, quindi, è quello di creare le condizioni affinché nuovi materiali e nuovi processi di Produzione possano essere utilizzati in applicazioni Automotive per migliorare l'efficienza energetica complessiva e le prestazioni del veicolo e possano essere integrati in modo competitivo nel contesto delle filiere e dei sistemi produttivi esistenti.

La riduzione del peso è certamente il metodo più diretto per ridurre il consumo di carburante e di conseguenza le emissioni dei mezzi di trasporto. Si stima che una riduzione del 10% di peso porti ad una riduzione di carburante di circa il 7% e questo comporta che per *ogni kg di peso risparmiato si riduca di circa 20 kg l'emissione annua di* CO_2.

Questo legame, ben noto ai costruttori di automobili, ha portato in questi anni alla sostituzione, dove possibile in termini tecnici ed economici dei componenti in acciaio in componenti in alluminio, magnesio, compositi e schiume. L'applicazione di nuovi tipi di materiali necessita di una riprogettazione dei componenti e lo sviluppo delle necessarie tecnologie per il loro impiego in modo economico, sicuro, considerando anche le problematiche di riciclabilità a fine vita dei materiali utilizzati.

Andrebbero quindi parallelamente ingegnerizzati e testati nuovi materiali fibro-rinforzati inorganici, per ottenere alleggerimento e al contempo, aumentare la protezione del passeggero. Le attuali tecnologie permettono di ottenere componenti in composito termo-strutturale resistente al fuoco, con capacità di coibentazione termica almeno due ordini di grandezza superiore al corrispondente componente metallico e con peso specifico inferiore a 2 g/cm^3.

Anche i costi di una produzione di massa appaiono compatibili con un'applicazione su larga scala.

Nell'ambito dei materiali avanzati e delle nano-tecnologie i materiali plastici (polimeri - e loro derivati – sia termoplastici sia termoindurenti) sono sicuramente di grande interesse per le notevoli potenzialità di sviluppo, sia in nuovi ambiti applicativi, sia per il possibile miglioramento di quelli in cui sono già utilizzati. Di particolare rilevanza risulta essere anche lo sviluppo di "sandwich" di materiali di diversa origine, quali leghe leggere accoppiate con substrati polimerici semplici e/o rinforzati con fibre.

Alcuni dati relativi all'impiego di materiali leggeri nel settore dei trasporti sono[3]:

- Un sostanziale incremento continuo dell'impiego di materiali leggeri nel settore dei trasporti

3 MC Williams (2007), Advanced Materials, Lightweight Materials in Transportation, Report Code: AVM056B

a partire dalle 46,7 Mton del 2010 fino alle 67,7 Mton del 2015 con un incremento di circa il 10% annuo.

- I materiali più utilizzati in termini di peso sono gli *acciai ad elevata resistenza* seguiti dalle leghe di alluminio e dai materiali plastici. In termini di segmento di mercato, in realtà sono le materie plastiche seguite dagli acciai ad elevata resistenza e dalle leghe di alluminio.
- L'industria *Automotive* è il principale *end-user* dei materiali leggeri seguita in termini di peso dalla cantieristica *navale* e dal settore *aeronautico*. Quest'ultimo, tuttavia, in termini di valore risulta secondo in quanto i materiali utilizzati in questo settore hanno certamente un costo per unità di peso superiore a quelli impiegati nella cantieristica navale.

In differenti vie e puntando su diversi tipi di materiali leggeri (dagli acciai ad elevata resistenza fino ai materiali per interiors in schiume plastiche), i produttori di automobili stanno tutti mirando ad una riduzione del peso che non comporti grosse variazioni di costi.
Esperienze in tempi recenti dimostrano che i principali produttori di automobili guardano con rinnovato interesse a materiali compositi avanzati con nuovi processi automatizzati di produzione; gli esempi sono il gruppo VW con Lamborghini (Aventador, Huracan), Bugatti (Veyron), Audi (R8), Alfa Romeo (4C, Giulia), Ferrari (la Ferrari), Porsche (918) ma il più eclatante è BMW con le vetture ibride i3 (numeri di produzione stimati molto elevati) e i8, che stanno rivoluzionando il mercato dell'automobile, progetti in cui il minimo comune denominatore è la volontà di sfruttare vantaggi prestazionali di materiali compositi con fibra di rinforzo in carbonio creando nuovi processi automatizzati che rendano il processo efficiente e limitino il costo del prodotto finale con benefici per performance e peso, anche su vetture di serie.

Ovviamente questo impone una riprogettazione dei componenti ed una rivisitazione delle tecnologie di fabbricazione che molto spesso necessitano di adeguato sviluppo. Uno studio della Lotus Engineering[4] conclude che una riduzione della massa di un veicolo del 38% potrebbe essere conseguita con un incremento di costo estremamente limitato valutato intorno al 3%.
Ad oggi, la maggior parte dei produttori Automotive realizza quello che viene definito come Body in White (BiW), ovvero la struttura principale degli autoveicoli in acciaio stampato e saldato.
Sono pochi i costruttori che hanno un BiW realizzato in Alluminio (Ferrari, Jaguar Land Rover, Audi,) mentre sono pochissimi in materiali differenti che sono principalmente basati su compositi a base di fibre (Carbonio, Vetro, Kevlar).
Questo trend è in profondo mutamento tanto che vari produttori (Ferrari, Audi, BMW, ecc.) stanno rivedendo le strategie sul BIW per introdurre frazioni più rilevanti di materiale composito CFRP per limitare pesi e migliorare rigidezza/resistenza. BMW ha rivoluzionato il settore con le vetture "i" (ottenute con processi automatizzati di RTM "resin transfer moulding" e press moulding) e diviene ora vitale la ricerca di processi innovativi per rendere l'applicazione dei materiali compositi in vetture di serie sostenibile a livello economico.
Le ben note caratteristiche meccaniche (resistenza e rigidezza) e le relative tecnologie di forma-

4 Lotus engineering, co., (2010), An Assessment of Mass Reduction Opportunities for a 2017 –2020 Model Year Vehicle Program, March 2010

tura e saldatura degli acciai conserveranno la leadership nella realizzazione del BiW, che incide per il 20% sul peso complessivo delle automobili, mentre maggiori applicazioni di materiali leggeri sono previste per componenti di carrozzeria, dello chassis e dei motori.
Considerato che Alluminio, Magnesio o Schiume Metalliche hanno un costo di base certamente superiore al tradizionale componente in acciaio, è necessario sfruttare in modo ottimale questi nuovi materiali con lo sviluppo delle tecnologie di formatura e giunzione in grado di ridurre i costi di produzione in modo da compensare i maggiori costi delle materie prime.
Le tecnologie che necessitano certamente di sviluppo sono da un lato le tecnologie di produzione di nuovi materiali che portino ad una sostanziale riduzione di costo, dall'altro le tecnologie di formatura e di giunzione ad elevata efficienza che permettano il migliore sfruttamento possibile dei nuovi materiali per il trasporto ed una sostanziale riduzione dei costi di produzione. Ovviamente l'altra leva notevole per permettere la penetrazione di questi nuovi materiali è il miglioramento che questi permettono in termini di confort e sicurezza nei vettori per il trasporto. In sintesi possono essere individuate:

- Tecnologie di fabbricazione di materiali leggeri e a elevata riciclabilità;
- Tecnologia di assemblaggio a elevata efficienza (formatura, saldatura).

Tecnologie di fabbricazione di materiali leggeri e a elevata riciclabilità

Tra gli obiettivi primari d'interesse per il settore del trasporto su gomma, possiamo citare la riduzione di peso, la semplificazione del riutilizzo e dello smaltimento, la "funzionalizzazione", l'utilizzo di processi produttivi basati su tecnologie additive. Nano-tecnologie e materiali avanzati possono contribuire in modo significativo al raggiungimento di questi obiettivi.
Lo sviluppo di tecnologie per la fabbricazione di materiali leggeri strutturali per il settore dei trasporti è legato principalmente alle tecnologie per la produzione di materiali metallici cellulari a base di leghe leggere, in particolare di alluminio ma anche di acciai. Mentre, per l'allestimento la ricerca è mirata principalmente allo sviluppo di materiali polimerici o biopolimerici e schiume termoplastiche rinforzate con fibre naturali in modo da massimizzare le proprietà di riparabilità e riciclabilità a fine vita.
I materiali metallici cellulari a celle chiuse per uso strutturale sono in pratica in mano ad un unico fornitore mondiale (Ecka-Granules). L'elevato costo di questi materiali non ha permesso una loro penetrazione a livello industriale con poche applicazioni di tipo strutturale. Le particolari proprietà di assorbimento di energia e delle vibrazioni, tuttavia, candidano questi materiali ad un ampio utilizzo in componentistica per *Crashworthiness* in micro car o come materiale strutturale collaborativo con main frame in alluminio per i grossi vettori del trasporto navali e terrestri. Questo tipo di materiali dà l'opportunità di garantire un elevato livello di confort, un'elevata sicurezza passiva intrinseca, schermatura elettromagnetica e leggerezza, con riduzione dei consumi e delle emissioni associate ad un'elevata riciclabilità.
Le tecnologie che vanno sviluppate per la riduzione dei costi sono legate ai processi di produzione per metallurgia delle polveri e fonderia. In particolare, lo sviluppo delle tecnologie per la fabbricazione di schiume metalliche di alluminio nel panorama nazionale permetterebbe di rompere il monopolio con una riduzione dei costi del materiale base che porterebbe ad una maggiore appli-

cazione grazie a maggiori economie di scala. Lo sviluppo di tecnologie per la produzione di materiali metallici cellulari a base di acciaio permetterebbe di avere a disposizione tutta una nuova fascia di materiali per la componentistica di motori che avrebbe il duplice vantaggio, di ridurre il peso dei componenti motore ma di ridurre anche la conducibilità termica e aumentare le proprietà di damping, con effetti positivi in termini di rendimento termico e confort.

La tecnologia della metallurgia delle polveri sia a livello mondiale sia a livello italiano è concentrata principalmente nella realizzazione di componenti a geometria complessa in leghe di ferro e di cuscinetti autolubrificanti in leghe di rame.

Più del 50% di fatturato dell'industria della sinterizzazione italiana viene assorbito dal mercato Automotive mentre a livello europeo l'80% delle applicazioni complessive è destinato al settore Automotive per componenti che vanno dalla trasmissione, al motore e al telaio[5].

Il settore della metallurgia delle polveri di alluminio è invece molto più limitato a livello europeo e quasi inesistente in Italia [6] se non a livello di studi.

Considerando che anche la distribuzione delle polveri di alluminio è attualmente in mano a pochissimi fornitori mondiali è necessario un forte investimento sul settore industriale nelle Tecnologie di atomizzazione e produzioni di polveri anche a partire da trucioli di lavorazione meccanica per ridurre i costi.

Anche il Titanio con le relative polveri merita una giusta attenzione. Le tecnologie per la trasformazione del tetracloruro di Ti in Titanio CP (commercialmente puro), infatti, hanno avuto negli ultimi anni sviluppi molto interessanti sotto il profilo del costo del processo. Prendendo come riferimento il processo tradizionale (KroII) di produzione della spugna di titanio a partire da TiCl4, i processi innovativi di produzione di polveri di Titanio CP (basati su brevetto Armstrong) potrebbero potenzialmente abbattere il costo di produzione anche del 40-50%. La polvere di Ti così ottenuta può anche essere utilizzata come materia prima per una serie di processi di compattazione e sinterizzazione con l'obiettivo di fornire prodotti laminati, come lamiere, nastri, lastre, barre, fili e preforme da stampaggio massivo. Ulteriori sviluppi sono possibili sulle tecniche di utilizzo delle polveri e sue trasformazioni in semilavorati pronti per la trasformazione finale. L'adozione di leghe ottenute per combinazione di titanio CP e alliganti permette la produzione di leghe dalle caratteristiche meccaniche finali interessanti anche per usi strutturali. Questo abbattimento del costo di produzione della materia prima, rimette in gioco l'applicabilità del Titanio sul sistema autoveicolo. Il processo di produzione ha anche risvolti interessanti sulla eco-compatibilità.

In modo complementare lo sviluppo di tecnologie di fabbricazione di compositi termoplastici rinforzati con fibre naturali, se da un lato non possono garantire la realizzazione di materiali a maggiore resistenza peso, dall'altra garantirebbero la disponibilità di materiali plastici ad elevata riciclabilità che possano sfruttare nel modo migliore la produzione di fibre vegetali autoctone (fibre di canapa, o di legno).

Per quanto riguarda i materiali polimerici, in Europa e negli Stati Uniti, la produzione dei compositi a matrice polimerica sta passando da una fase in cui le applicazioni erano principalmente orienta-

5 http://www.assinter.it/Mercato_Metallurgia_Polveri.pdf

6 http://www.assinter.it/Componenti_in_Alluminio_Sinterizzato.pdf

te a nicchie di mercato ad elevato valore aggiunto (aerospaziale e aeronautico ecc.) ad un'altra in cui i settori tradizionali affiancano, con applicazioni meno sofisticate e produzioni di massa, settori come quello automobilistico e dei beni comuni.
Questa fase è già molto attiva nel senso che nell'ultimo anno l'applicazione dei compositi termoindurenti a scopo strutturale rinforzati fibra di carbonio è passata dal settore aerospace (anche su prodotti per trasporto civile Boeing 787, Airbus A-350) fino al settore automotive (seppur di nicchia, si sta allargando a macchia di leopardo in applicazioni per vetture di produzione di massa), al settore treni (ci sono già diverse applicazioni sia sulle carrozze che sugli interni), al settore eolico e ai settori industriali.
Le principali aree d'interesse sono:

- Sviluppo di processi automatizzati, ripetibili e sostenibili per materiali con matrici termoindurenti per applicazioni strutturali;
- Sostituzione delle matrici termoindurenti con quelle termoplastiche in settori di mercato attualmente non coperti;
- Tecnologie per il riciclo dei materiali compositi, fibre e resina;
- Produzione fibre e resine low cost per prodotti di produzione di massa;
- Utilizzo di resine e fibre da fonti naturali;
- Normative sostanze pericolose (REACH), riciclabilità, "Conflict minerals", "Critical raw materials";
- Nano-tecnologie per materiali polimerici e fibro-rinforzati;
- Tecnologie per il miglioramento delle proprietà dei materiali plastici;
- Tecnologie per il trattamento dei tessuti;
- Tecnologie di additive manufacturing per componenti metallici.

Gli obiettivi già sopra citati, potranno essere perseguiti attraverso varie linee di ricerca su materiali polimerici innovativi e nano-tecnologie, quali ad esempio:
Lo sviluppo e l'impiego su larga scala di materiali fibro-rinforzati a matrice termoplastica, consentirebbe di migliorare la processabilità e il recupero a fine vita rispetto ai tradizionali materiali fibro-rinforzati a matrice termoindurente.
L'impiego di processi di trasformazione che consentano di ridurre la quantità, e quindi il peso, di materiale impiegato, senza influire negativamente sulle caratteristiche meccaniche.
Il miglioramento delle caratteristiche dei materiali utilizzati nella trasformazione mediante processi di additivazione (la cosiddetta stampa 3D), permettendo di ridurre sensibilmente il costo di componenti prodotti in piccole serie e le pre-serie prototipali.
La funzionalizzazione dei materiali plastici, utilizzati nella maggioranza dei casi come elementi di contenimento o di ricopertura, consentirebbe di realizzare, ad esempio, la trasmissione di segnali elettrici e/o di calore, piuttosto che un cambiamento di colore o una variazione delle proprietà ottiche – riflessione/trasparenza – del componente "funzionalizzato". A tal fine si immagini, ad esempio, un'analogia con l'epidermide umana che, oltre a "contenere" organi, muscoli, scheletro, ecc., è anche in grado di rilevare e trasmettere segnali al sistema nervoso, variare di colore, emettere e/o assorbire liquidi, ecc., analogamente il materiale plastico utilizzato prevalentemente

come supporto o contenitore di altri componenti più "nobili", potrebbe svolgere funzioni "sensoriali", consentendo ad esempio, la trasmissione di segnali elettrici senza la necessità di cavi, connettori, interruttori, ecc. Le nanotecnologie applicate al settore dei polimeri riguardano prevalentemente la produzione di materiali contenenti cariche di dimensione nanometrica, capaci di conferire particolari caratteristiche e qualità alla matrice polimerica, sia in termini di miglioramento della processabilità, sia conferendole particolari caratteristiche funzionali. Esistono già numerosi studi al riguardo con l'utilizzo di nanocariche disponibili sul mercato (ad es. sepioliti, montmorilloniti, nanotubi di carbonio, grafene), che confermano la possibilità di migliorare il processo e/o le specifiche caratteristiche del polimero.

Miglioramento del processo di trasformazione

La tecnologia più diffusa per la realizzazione di componenti in materiale plastico è lo stampaggio con utilizzo di presse a iniezione e dei relativi stampi. Come già detto la riduzione di peso dei componenti stampati è uno degli obiettivi primari nel settore del trasporto su gomma, e la dispersione mediante compoundazione meccanica di cariche nanometriche è una delle tecnologie più promettenti per il miglioramento delle caratteristiche di base del materiale, che si traducono in un miglioramento delle sue proprietà meccaniche.

Il miglioramento delle prestazioni e/o la riduzione di peso possono essere ottenuti agendo su diversi fattori:

La tipologia di polimero utilizzato

migliorando le caratteristiche meccaniche intrinseche del materiale, si ottengono, ovviamente, componenti più leggeri; oggi la scelta di polimeri ad alte prestazioni è molto vasta, ma l'additivazione con specifiche nanocariche consentirebbe di ottenere polimeri ottimizzati per uno specifico impiego.

L'ottimizzazione della progettazione del componente

aumentando la quantità di materiale dove maggiori sono i carichi e riducendola dove non necessario, compatibilmente con la realizzazione fisica e con il processo impiegato nella produzione del componente, si ottengono prodotti più leggeri; in questo caso è necessario lo sviluppo di software di progettazione che siano in grado di tener conto con la massima precisione sia delle specifiche proprietà meccaniche del materiale (polimero base, nanocariche, fibre di rinforzo) che del processo di trasformazione.

L'impiego di tecnologie di stampaggio microcellulare

queste tecnologie di processo consentono la realizzazione di una struttura microcellulare a celle chiuse che, opportunamente simulata in fase di progettazione e realizzata durante il processo produttivo, consente una riduzione di peso del componente anche dell'ordine del 30-40%, senza influire negativamente sulle sue proprietà di resistenza meccanica e partendo dallo stesso polimero di base.

L'impiego di tecnologie di stampaggio che migliorino il processo di riempimento e compattamento del materiale nello stampo

tecnologie di processo che prevedano il condizionamento dinamico degli stampi (processo heat & cool), di modo da ridurre gli spessori e migliorare le linee di giunzione, consentono una riduzione della quantità di materiale utilizzato. In tal modo è anche possibile ottenere un aspetto estetico superficiale di altissima qualità, che consente in molti casi di eliminare i processi di verniciatura, con conseguente ulteriore miglioramento dell'impatto ambientale legato alla produzione del componente.

Compositi termoplastici

questa tecnologia si riferisce alla realizzazione di componenti complessi, ottenuti da una "preforma" in tessuto di fibre ad alte prestazioni (es. fibre di carbonio, ma anche di vetro), impregnato con resine termoplastiche e sovrastampato con la stessa resina che costituisce il legante del tessuto di rinforzo. In pratica la resistenza "strutturale" del componente è ottenuta con l'ausilio della fibra di rinforzo, mentre il "sovra-stampaggio" del polimero consente di realizzare, ad esempio, le giunzioni, gli aggraffaggi, alcune parti estetiche, ecc. Questo processo consente importanti riduzioni di peso del componente, dell'ordine in molti casi del 40-50%. Rispetto al più tradizionale utilizzo di materiali rinforzati a matrice termoindurente, il composito termoplastico presenta numerosi e importanti vantaggi in termini di velocità e ripetibilità del processo e di trattamento a fine vita del componente, che permette una più facile separazione e recupero della fibra di rinforzo e del polimero.

Biopolimeri

lo sviluppo di nuovi polimeri da fonti rinnovabili che possa generare materiali con caratteristiche analoghe o superiori a quelle dei polimeri tradizionali, è una sfida importante nell'ottica della sostenibilità ambientale. Oggi i biopolimeri disponibili sono utilizzati in minima quantità nel settore del trasporto, soprattutto per il loro costo troppo elevato. Purtroppo il circolo vizioso legato ai "bassi volumi produttivi=elevati costi" è difficile da spezzare senza una precisa volontà politica che agevoli l'introduzione sul mercato dei polimeri da fonte rinnovabile. Ben inteso le tecnologie riferite ai punti precedenti sono in gran parte applicabili anche ai biopolimeri.

Miglioramento delle caratteristiche funzionali

Mediante l"utilizzo di nanocariche disperse nella matrice polimerica è possibile conferire al polimero specifiche caratteristiche funzionali, è noto da tempo, infatti, che si possono migliorare, ad esempio, le caratteristiche di resistenza al fuoco, le proprietà isolanti, ecc.

Di particolare interesse e fortemente innovativo è l'utilizzo di nanocariche (in particolare carbonanotubi – CNT o del grafene) per il conferimento di caratteristiche funzionali al polimero e, di conseguenza, al componente che con lo stesso viene realizzato.

A titolo di esempio con questa tecnologia è possibile realizzare componenti che, mediante un successivo trattamento, detto di "attivazione", presentino localmente caratteristiche diverse (addirittura opposte) a quelle tradizionali dei materiali polimerici da cui derivano. Dal punto di vista

pratico potrebbe significare la realizzazione di una plancia per autoveicolo con materiale caricato con CNT; dopo lo stampaggio con una pressa ed uno stampo "tradizionali" è possibile mediante l'impiego di una sorgente laser, attivare un "percorso" all'interno del componente dove il materiale viene reso conduttivo alla corrente elettrica o al calore. Sarà possibile in tal modo eliminare i cavi e gli interruttori necessari al trasferimento e/o all'attivazione di un segnale elettrico, con grandissimi vantaggi in termini di semplificazione costruttiva, riduzione del numero di componenti, maggiore affidabilità, riduzione del peso, per citarne alcuni.

Materiali per produzione additiva

Il limite attuale della produzione additiva (stampa 3D) è soprattutto legata alle prestazioni meccaniche del componente realizzato e al limitato numero di materiali disponibili per l'utilizzo con questo processo. Lo sviluppo di nuovi materiali polimerici per produzione additiva è elemento imprescindibile alla diffusione di questa tecnologia. Sulla base di alcune ricerche preliminari, si può ritenere che specifiche nano-cariche possano migliorare la resistenza meccanica di componenti realizzati con materiali polimerici mediante produzione additiva, ad esempio migliorando l'adesività tra i successivi strati depositati, che si traduce nel miglioramento delle proprietà meccaniche del componente.

Tecnologie per il miglioramento delle proprietà dei materiali plastici

Brillantezza e omogeneità del colore: gli attuali trend di stile indicano che superfici plastiche opache ed uniformi vengono percepite di elevata qualità tecnica, elevata resistenza all'usura, robustezza e solidità. Lo stato dell'arte attuale prevede la verniciatura soft, ma sono allo studio nuove soluzioni alternative quali:

- Materiali a base PP con microdispersione di cariche EPDM.
- Trattamenti di opacizzazione per lavorazione dello stampo mediante laser o plasma e auspicabili altri spunti di ricerca in questo campo.

Processi IMD e IML con layer ad alta robustezza meccanica/chimica e con

- Caratteristiche ottiche specifiche in termini di riflettanza e trasmittanza;
- Effetti ottici che conferiscano 3D e profondità ai componenti.

Superfici ad alto gloss sia per applicazioni d'interni sia per esterni: hanno un ottimo riscontro dal punto di vista della qualità percepita e diversi approcci alternativi alla verniciatura. Sono applicati e in fase di studio, basati sull'accoppiamento di materiali differenti per ottenere brillantezza abbinata a resistenza all'abrasione.

Effetti estetici eco

Effetti stilistici che ricordino materiali naturali quali legno, cuoio, sughero sono molto richiesti per applicazioni interni. Miglioramento del mix di materiali plastici e fibre naturali e l'allineamento con le performance meccaniche e di resistenza a UV richieste, sono step molto importanti nello sviluppo di questi nuovi contenuti.

Comfort termico di contatto

I sistemi interni sottoposti alla radiazione solare, specie se di colore scuro, sono soggetti ad accumulo di calore per effetto dell'irraggiamento e conseguente condizione di comfort al contatto (oltreché in marcia a causa del rilascio di tale calore in abitacolo). Sono allo studio soluzioni in grado di migliorare il comfort termico di contatto attraverso la riduzione del contributo per irraggiamento in modo passivo:

- Materiali compositi ad elevata riflessione radiazione IR (Infra-Red).
- Vernici, rivestimenti e trattamenti superficiali ad elevata riflessione IR.
- Trattamento dei vetri per limitazione della trasmissione infrarossa.
- Processi PVD per conferire metallizzazione con effetto caldo.

Soft touch

L'effetto di morbidezza al tatto (cedevolezza) è in grado di conferire sensazione di qualità e sicurezza, ma attualmente limitato dagli alti costi dei corrispondenti processi produttivi. Si prevede un forte impulso alla ricerca sui cosiddetti processi "one-shot" per il conferimento dell'effetto soft-touch in un'unica stazione di stampaggio. I processi di modificazione dello stampo sono tramite laser etching ed etching fisico in modo da strutturare la superficie metallica in dimensione millimetrica e micrometrica. Tecnologia alternativa è quella di processi IMD e IML con layer soft-touch in modo da includere direttamente nel componente un label funzionale.

Superfici ottiche

Gli attuali trend di stile indicano che superfici plastiche saranno usate per lenti di protezione per componenti contattabili sia in dispositivi HMI che in sensori integrati. Attualmente non esistono soluzioni che rispondano allo stesso momento a esigenze ottiche e di robustezza chimico/fisica. Nuove soluzioni alternative sono:
Processi IMD e IML con layer ad alta robustezza meccanica e chimica e con caratteristiche ottiche specifiche in termini di riflettanza e trasmittanza.
Processi di trattamento degli stampi metallici, nonché di cilindri nel caso della calandratura, in modo da controllare la rugosità superficiale e conferire specifiche caratteristiche ottiche.

Rigabilità e scrivibilità

I materiali polimerici utilizzati attualmente (PP) per componenti ad elevato contatto hanno il limite di essere sensibili all'usura e all'abrasione. Questi fenomeni causano la facile rigabilità e affioramento delle cariche minerali conferendo un aspetto di scarsa qualità. Sono allo studio soluzioni permanenti per il miglioramento della qualità nel tempo quali ad esempio il trattamento al plasma per la deposizione di coating e indurimento superficiale. Inoltre per alcuni componenti soggetti a urti per "scarpata" lo studio bilanciato di materiali e goffrature rappresenta uno step innovativo importante per ulteriormente migliorare la qualità percepita delle superfici plastiche.
Scricchiolii:

- Miglioramento caratteristiche superficiali per compatibilità vs. squeak&rattles.
- Interposizione di materiali ad alta compatibilità relativa.

- Miglioramento caratteristiche morfologiche delle superfici a contatto.
- Miglioramento processi vs stabilità dimensionale.
- Riciclabilità materiali.

Analisi delle caratteristiche intrinseche dei materiali, della separazione post frantumazione, del recupero energetico, della disponibilità filiere di trattamento e mercati di sbocco.

Adesione superficiale

L'adesione fra due superfici e l'incollaggio di due componenti plastici risulta essere spesso limitato dalla presenza di un promotore di adesione sia esso un primer sia un processo di modifica superficiale quale fiammatura o plasma. Le nuove soluzioni riguardano:

- Sviluppo di adesivi a presa rapida e facile dispensing (temperatura, dosaggio) per incollaggio plastiche e metalli (ad esempio policarbonato).
- Processi di plasma atmosferico in sostituzione della fiammatura standard per la riduzione della tensione superficiale di materiali plastici prima della verniciatura (e.g. polipropilene).

Trattamento dei tessuti

In particolare legati alla selleria dei sedili e dei pannelli porta, ma anche ai materiali acustici, tappeti e isolamenti e, in alcuni casi, alla ricopertura del modulo plancia. I tre effetti principali a cui verrà indirizzata la ricerca e innovazione possono essere sintetizzati nel modo seguente:

Usura e peeling

Causate da sollecitazioni meccaniche ripetute di sfregamento, pressione dall'esterno e attrito interfibra a cui si sta cercando di porre rimedio attraverso tecnologie di trattamento del tessuto e direttamente del filato (trattamento al plasma dei tessuti, trattamenti a immersione, ...).

Sporcabilità

I rivestimenti tessili Automotive di normale impiego sono soggetti a fenomeni di sporcamento, irreversibili nel caso degli agenti sporcanti più frequenti. Anche in questo caso la ricerca va indirizzata su tecnologie di trattamento dei tessuti (plasma, immersione, ...) in grado di conferire proprietà di idro-oleo repellenza per il ripristino della superficie macchiata.

Battericità e odori

I rivestimenti tessili Automotive di normale impiego sono soggetti alla presenza di micro-organismi e la conseguente generazione di odori sgradevoli (muffe, umido, ...) e l'attuale composizione chimica dei materiali utilizzati per tali tessuti e il relativo finissaggio non prevedono particolari caratteristiche antibatteriche. Allo studio tecnologie per la deposizione di sostanze chimiche batteriostatiche e igienizzanti.

Funzionalizzati

L'integrazione di sistemi attivi su tessuti mediante accoppiamento di film plastici e trattamenti

superficiali rappresenta un'interessante sviluppo per migliorare l'integrazione. Tecniche di deposizione a basso costo e di accoppiamento di film funzionalizzati sono oggetto di studio per raggiungere l'integrazione di diverse funzionalità quali sensori di posizione, attuatori, pulsanti e illuminazione su tessuti per sedili e rivestimenti.

Tecnologie di additive manufacturing per componenti metallici

Le tecnologie additive rapide (Rapid Additive Manufacturing) per materiali metallici si basano principalmente sull'impiego di laser selecting melting (LSM). Tale tecnologia permette la realizzazione di componenti 3D a forma complessa in differenti tipi di lega (alluminio, acciaio, titanio). La realizzazione di componenti in titanio e in generale di leghe ad elevata reattività con la tecnologia LSM impone tuttavia particolari accorgimenti in termini di contenuto di ossigeno sia nelle polveri utilizzate sia nell'ambiente di lavoro che necessariamente deve essere in atmosfera inerte controllata (argon).

Per tale ragione le tecnologie di produzione additive sotto vuoto promettono risultati migliori per cui a fianco alle tecnologie LSM che permettono una migliore finitura superficiale dei componenti sono state sviluppate tecnologie Electron Beam Melting in grado di lavorare con polveri di metalli altamente reattivi e materiali in generale non trattabili o difficilmente trattabili con il LSM.

Per quanto riguarda le tecnologie per la produzione di componenti mediante Electron Beam esistono due approcci principali, il primo legato all'impiego delle polveri, il secondo all'impiego di filo.

La prima tecnica sviluppata dalla Chalmers University permette la produzione di pezzi a geometria complessa a partire da modelli CAD e permette di realizzare componenti ad elevata densità mediante l'utilizzo di un cannone elettronico. Le parti sono fabbricate sotto vuoto ad una temperatura di preriscaldo di circa 1000°C per ridurre le tensioni interne al manufatto e migliorare quindi le caratteristiche meccaniche del componente finale. Anche con questa tecnica come per altre tecniche di prototipizzazione 3D rapida, il componente richiede delle lavorazioni di finitura finali. Questo tipo di processo grazie alle particolari cinetiche di lavorazioni rese possibili dalla lavorazione sotto vuoto e dalla notevole efficienza energetica della EB, permette di realizzare componenti di maggiore qualità rispetto ad esempio alle tecniche che impiegano principi analoghi ma con fusione tramite laser.

Altra tecnica meno flessibile ma utilizzata già da un decennio dalla Sciaky, Inc. è la Electron Beam Free Form Fabrication (EBFFF) basata sulla deposizione sotto vuoto di forme a geometria meno complessa ma ad elevata produttività (18 kg/h). Questa tecnica è utilizzata anche per la riparazione di componenti. Le lavorazioni meccaniche necessaria all'ottenimento della forma finale sono certamente maggiori rispetto alla metodologia che impiega polveri.

Per quanto riguarda lo sviluppo di processi di produzione per Electron Beam selective Melting, attualmente risulta prevalere un monopolio sulla disponibilità di impianti EBM prototyping. Infatti, il processo sviluppato dalla Chalmers University è stato adottato industrialmente dall'ARCAM (Svedese) con un sistema EBW da 4 kW e attualmente risulta l'unico disponibile sul mercato. Il vantaggio rispetto ad altri sistemi come ad esempio quelli basati sulla tecnologia Laser Selective Melting è la possibilità di lavorare sotto vuoto materiali non trattabili o difficilmente trattabili con la tecnologia laser (vedi leghe di titanio e acciai ad elevata resistenza).

Per il settore trasporti navali, ferroviario e automotive, è possibile immaginare l'applicazione di tali tecnologie per particolari componenti di motori, chassis o a componenti di design per la personalizzazione. Inoltre, per il settore navale e ferroviario tali tecnologie possono avere un grande sviluppo anche nel settore delle riparazioni, di componenti quali eliche, assili etc. dove il substrato di deposizione diviene in componente danneggiato.
In Italia, esistono realtà che impiegano "stampanti 3D" di metalli in particolare nel settore aerospaziale, tuttavia non esiste una filiera relativa né alle materie prime, principalmente polveri, né per lo sviluppo di apparecchiature.
Le tecnologie additive sono oggi considerate le tecnologie di produzione del futuro. Sarebbe necessario quindi uno sforzo nazionale al fine di recuperare il ritardo sia nello sviluppo di tecnologie simili alle esistenti sia di tecnologie nuove per consentire la riduzione dei costi d'impianto e lo sviluppo di nuove e appropriate materie prime specifiche per i vari settori del trasporto (automotive, ferroviario e navale) per differenti applicazioni dalla produzione a minor costo alla riparazione.

Nel seguito si riportano alcune finalizzazioni sul prodotto:

- Nuove lamiere in acciaio ultra-alto resistenziale per l'alleggerimento a costi sostenibili delle zone della scocca più sollecitate a resistenza, laddove l'incremento delle caratteristiche di snervamento del materiale consente di ridurre lo spessore del lamierato a pari prestazione del componente. Devono intendersi incluse anche le tecnologie per indirizzare localmente le proprietà del materiale in modo da ottimizzare le prestazioni e minimizzare il peso quali lamiere multispessore mediante saldatura e/o opportuni sistemi di laminazione, proprietà differenziate mediante trattamento termico.
- Lamiere, estrusi e fusioni di leghe leggere (alluminio, magnesio) con materiali e processi innovativi per il miglioramento del rapporto tra prestazioni e peso delle strutture del veicolo (scocca/parti mobili/componenti), privilegiando le soluzioni che offrono l'opportunità di integrare funzioni (fissaggi, proprietà NVH, assorbimento di energia, etc.) sia a livello di materiale sia a livello di componente/sottogruppo e quindi possono compensare almeno parzialmente il maggior costo rispetto alle soluzioni stato dell'arte. Sono incluse in questo capitolo i materiali sandwich, le combinazioni ibride con altri materiali (es. con compositi), le tecnologie Near Net Shape e le tecnologie di formatura a caldo di lamierati ed estrusi.
- Compositi termoindurenti ad elevate prestazioni: per alleggerimento del BIW e delle parti mobili, studiando appropriatamente la giunzione fra le parti metalliche e quelle composite. Per lo più materiali rinforzati con fibra di carbonio, con processi produttivi adatti a larghi volumi di produzione (vedi nuova Lamborghini Gallardo – Huracan con BIW alluminio - CFRP e nuova BMW i3 con BIW e carrozzerie in CFRP). Altri esempi parti semi strutturali come sedili prodotti con resine termoindurenti e rinforzo a fibra corta (non solo carbonio) con processo di stampaggio, strutture di assorbimento energia in CFRP che sfruttino le caratteristiche non paragonabili a materiali metallici tradizionali nell'assorbimento dell'energia durante gli urti. Numerosi produttori stanno anche commercializzando vetture con pannelli di carrozzeria in composito in ottica riduzione peso.
- Compositi termoplastici ad elevate prestazioni e alta riciclabilità primariamente per l'allegge-

rimento di parti mobili, nonché per componenti assemblati separatamente dalla scocca: quali front-end, traverse paraurti, parafanghi, finizioni esterne. Sono inclusi i materiali compositi con fibra di carbonio allo studio per applicazioni su medi volumi. La scelta dei materiali terrà in conto l'impatto sulla gestione del fine vita veicolo in termini di separazione e riciclo, privilegiando le soluzioni più efficienti da questo punto di vista e l'esistenza di "proven technologies" per il percorso di riciclo.

- Compositi a basso impatto ambientale per migliorare la sostenibilità ambientale del ciclo vita del veicolo grazie al minor consumo di risorse e di emissioni (es. energia, carbon footprint, etc.) collegato alla loro produzione/trasformazione. Sono incluse le matrici biopolimeriche derivanti da coltivazioni no-food attraverso processi chimici di trasformazione naturali (la cosiddetta "chimica verde") e le fibre di rinforzo naturali derivate da coltivazioni no-food o da scarti di coltivazioni food o da coltivazioni di terreni marginali. I fattori abilitanti per l'introduzione di tali materiali sono la garanzia della costanza delle proprietà nel tempo e la necessaria diminuzione del costo, possibile grazie alle economie di scala innescate dalla dimensione economica del settore (possibili applicazioni automotive in ordine crescente di difficoltà: imbottiture, pannelli non a vista, componenti estetici, componenti semi-strutturali e strutturali).

Un'altra tipologia di fibra ritenuta interessante per le sue potenziali applicazioni nel settore automotive è quella di basalto, in quanto di origine naturale, testata non tossicità e possibilità di applicazione in temperatura, garantendo rinforzo meccanico almeno fino a 600°C. In associazione a matrici inorganiche si può utilizzare per ottenere compositi ceramici termostrutturali fibrorinforzati utili per l'alleggerimento dei componenti soggetti a temperature non compatibili con compositi polimerici e leghe leggere.

Particolato fine (PM10 e PM2.5):

- Le emissioni di particolato fine non derivante da processi di combustione (usura di pneumatici, freni e asfalto) non sono ancora soggette a regolamentazione, pur costituendo circa la metà delle polveri sottili emesse "allo scarico". È necessario adottare tecnologie volte al miglioramento della composizione chimica del materiale d'attrito, per lo sviluppo di materiali "green" che emettano meno polveri e/o di granulometria non critica. In quest'ottica, l'adozione di materiali innovativi nell'ambito dei rivestimenti anti-usura per il controllo dell'attrito, come ad esempio rivestimenti ceramici innovativi e trattamenti superficiali speciali, risulta essere la strada migliore da perseguire. A tutto ciò, si aggiunge l'importanza di implementare sistemi di raccolta e strategie di guida assistita.
- Materiali metallici con Nano Particelle a elevato rapporto rigidezza/densità e materiali a elevato rapporto di efficienza (ρ/r) sono stati già sviluppati nel corso degli anni (e.g. MMC, CFRP, ceramici, ecc.), ma ad oggi hanno avuto una diffusione di nicchia a motivo di vari vincoli di volta in volta diversi, fra i quali spesso gli elevati costi di produzione, i bassi volumi produttivi ottenibili con le attuali tecnologie di trasformazione e le scarse proprietà meccaniche di duttilità.
- L'iniziativa include il trattamento di leghe leggere e la loro miscelazione con nano-particelle

grazie all'applicazione di campi esterni (per es. campi magnetici, ultrasuoni, ecc.). Le soluzioni tecnologiche oggetto di studio porranno particolare attenzione alle problematiche di fattibilità industriale e manterranno costi sostenibili rispetto ai volumi produttivi; una sensibilizzazione maggiore dell'utente finale sui vantaggi che questa tipologia di tecnologia apporta all'ambiente può aiutare a favorire la scelta di queste soluzioni, rispetto a soluzioni più economiche ma non eco-friendly ed energy saving.

Componenti Automotive in Titanio sottoposti ad elevate temperature e ambienti corrosivi:

- Grazie alla minor densità rispetto all'acciaio (4.5 t/m3 contro 7.8 t/m^3), l'adozione di componenti in titanio porta ad una riduzione di peso del veicolo e conseguente riduzione dei consumi e delle emissioni di CO_2 e di inquinanti.
- Resistenza alla corrosione senza pari, con una ricaduta diretta sull'affidabilità del veicolo nel tempo.

Gli ambiti di applicazione sono:

Sistemi di scarico:
la riduzione di peso del sistema di scarico può arrivare anche a 10 kg su un veicolo di medie-grandi dimensioni. L'incremento delle prestazioni in termini di resistenza alla corrosione conduce ad un componente sostanzialmente "for life". Le case automobilistiche stanno puntando molto sull'affidabilità dei veicoli, avendo ciò una ricaduta diretta sull'immagine del prodotto e dell'azienda. In questo settore potrà essere particolarmente efficace per l'alleggerimento anche l'introduzione di nuovi compositi inorganici termostrutturali, sulla stregua delle tecnologie sviluppate per il settore aerospaziale e della Formula 1.

Componenti del propulsore:
componenti in movimento come bielle, valvole, molle di richiamo. Grazie alla riduzione di peso dei componenti si ha una riduzione delle vibrazioni e delle sollecitazioni sugli elementi di sospensione.

Masse sospese e molle ammortizzatori:
la riduzione di peso dei componenti migliora l'handling del veicolo.

Corpo vettura:
parti mobili e fiancate.

Tecnologia di assemblaggio ad elevata efficienza (formatura, saldatura)

L'introduzione di nuovi materiali e l'esigenza di coniugare flessibilità, standardizzazione e produttività faranno da traino nei prossimi anni all'introduzione di *nuove tecnologie di giunzione* che siano idonee a garantire qualità e prestazioni di prodotto. Sono incluse le tecnologie di giunzione che possono, anche associate ai materiali convenzionali, contribuire a incrementare il li-

vello prestazionale del prodotto. I fattori abilitanti per l'introduzione di tali tecnologie sono legati al costo, alla produttività e alla robustezza dei processi proposti.
Le tecnologie sviluppate in questi anni per la realizzazione di strutture leggere in acciai ad elevate resistenza vanno dalla tecnologia di *Saldatura Laser* all'*Idroformatura* di forme complesse associate a *Tailored Blanks*.
L'impiego sinergico di tecnologie di giunzione innovative e robuste e di tecniche di formatura come l'*Idroformig* o la *Gas-forming* permettono con opportune sequenze di produzione di ridurre i costi in termini di tempi di produzione e di materie prime riuscendo a sfruttare nel modo più opportuno anche differenti tipi di spessori e materiali.
La tecnologia di saldatura laser su acciai è ormai matura, mentre necessita di ulteriori investimenti lo sviluppo di tecnologie di saldatura ad elevata efficienza su leghe di alluminio e magnesio che hanno problematiche di saldatura peculiari. Lo sviluppo di procedimenti di saldatura ibrida laser-arco, in particolare laser-TIG o laser-Plasma può portare notevoli vantaggi. La disponibilità di nuove sorgenti laser multi kW, con trasporto del fascio in fibra, permette di aprire scenari per l'applicazione di questa tecnologia anche su componenti di grande e grandissima dimensione impossibili da immaginare fino a qualche anno fa. Inoltre, l'incremento notevole dell'efficienza delle sorgenti laser associata all'incremento dell'efficienza di saldatura in termini di basso apporto termico necessario alla giunzione di un dato spessore di materiale permettono di avere dei benefici in termini di efficienza energetica del processo di saldatura e con conseguente riduzione di consumo primario di energia e quindi riduzioni di emissioni. A tutto ciò va associato l'incremento di produttività relativo alla riduzione delle distorsioni di saldatura.
Questi risultati già ampiamente conseguiti nel settore Automotive o dell'industria degli elettrodomestici e della carpenteria leggera non sono ancora maturi per i settori della carpenteria pesante (cantieristica navale e settore ferroviario). Tuttavia, l'ibridizzazione del processo di saldatura su componenti strutturali ha le potenzialità necessarie per il superamento di problematiche metallurgiche sia sulle più leggere leghe di alluminio e magnesio sia su acciai ad elevata resistenza permettendo di incrementare la qualità e la produttività del processo. Allo stesso tempo lo sviluppo di tecnologie per il controllo on line della qualità del giunto e di tecnologie di visione per l'auto adattamento alle condizioni del giunto (disallineamenti, gap, etc.) sono indispensabili per la realizzazione di "smart workstation" in grado di autoregolare entro certi limiti i parametri di saldatura grazie all'applicazione di tecnologie di autoapprendimento basati sullo sviluppo di reti neurali. Lo sviluppo di processi di formatura innovativi in particolare sulle leghe di alluminio permette di sfruttare a meglio le doti di questo tipo di materiali. La realizzazione di componenti a forma complessa senza la necessità di utilizzare linee di discontinuità permette infatti di massimizzare lo sfruttamento del materiale con un incremento della vita del componente legato alla riduzione delle zone di intensificazione della tensioni. La saldatura delle leghe di alluminio induce infatti in ogni caso un softening del materiale con la necessità di incrementare gli spessori nella zona di saldatura.
La realizzazione di componenti a geometria complessa mediante tecnologie di Idroforming e gasforming portano ad una sostanziale riduzione del peso dei componenti ed una maggiore produttività che si traduce in minor impiego di energia sia durante la fabbricazione sia durante la vita utile del componente.

Per ultimo, ma non per questo meno importante, è da sottolineare la ricerca di Tecnologie di giunzione/protezione dalla corrosione/verniciatura per materiali dissimili. Infatti, l'utilizzo ottimale dei materiali strutturali ai fini dell'alleggerimento, porterà a mix di materiali dissimili per i quali sarà necessario, come detto, un profondo re-engineering dei processi di assemblaggio e anche di nuove tecnologie di verniciatura (allo stato dell'arte sono fortemente verticalizzati sull'utilizzo di leghe di acciaio stampate e saldate). Sono incluse, inoltre, le soluzioni che consentono la protezione dalla corrosione all'interfaccia tra materiali dissimili (es. incollaggio, rivestimenti). Fattori abilitanti sono il costo, la produttività e la robustezza delle soluzioni proposte.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Uno degli obiettivi chiave per l'industria manifatturiera sarà non solo quello di progettare prodotti ecologici, ma al tempo stesso ***produrli con un approccio sostenibile***. Il concetto di produzione sostenibile può definirsi in sintesi come la produzione di beni attraverso tecnologie e processi che non inquinano, limitando nel contempo il consumo di risorse (materie prime, energia, acqua, materie prime, ..) nel rispetto dei vincoli di salute dei lavoratori e sostenibilità. L'aspetto della sostenibilità dei costi di prodotto diventa cruciale nell'affrontare le sfide dei prossimi anni.

Diverse tecnologie contribuiscono alla realizzazione del nuovo sistema di produzione sostenibile e direttamente correlate alla riduzione dei costi di produzione:

- Utilizzo di materiali alternativi (utilizzo di materiali rinnovabili, controllo dei metalli pesanti), la gestione coerente dei materiali pericolosi (metodi di misurazione, gli standard di trattamento) e maggiore utilizzo di bio-materiali.
- Soluzioni tecnologiche di processo che consentano l'utilizzo ottimizzato dei flussi energetici, la riduzione dell'impatto ambientale e il miglioramento dell'efficienza delle risorse.
- Tecnologie per la lavorazione, riciclaggio e recupero di materiali ed energia dai rifiuti, produzione di materie prime secondarie con un alto grado di purezza e ri-lavorabilità a più basso consumo energetico.
- Sistemi di produzione agili caratterizzati da un elevato livello di automazione dei processi, ottenuti mediante metodologie di progettazione che includono simulazione e ottimizzazione, tecnologie di controllo e cooperazione avanzate tra sistemi robotici.

Le attuali soluzioni architetturali in uso per il veicolo sono in evoluzione in particolare per l'evoluzione della Normativa sulla Passive Safety che, al fine di incrementare le possibilità di protezione per gli occupanti degli autoveicoli e della cosiddetta Utenza debole della strada (pedoni & ciclisti), ha determinato una marcata differenziazione a livello strutturale tra zona anteriore/posteriore e cellula (Body). Il risultato di tali interventi – unito alle conseguenze di arricchimento di contenuti veicolo in seguito ad aspettative e richieste varie dell'utenza (Comfort, Riconfigurabilità, Abitabilità) ha determinato negli ultimi 15 anni una costante tendenza all'incremento di massa nella parte strutturale del veicolo, che si è tradotta in una contestuale ricerca di soluzioni per l'alleggerimento in grado di favorire sia il mantenimento delle prestazioni veicolistiche che – tematica più recente – la tutela dei contenuti di Fuel Economy e di mobilità sostenibile.

Anche se l'emissione della maggior parte degli inquinanti dell'aria è diminuita in modo significativo nel periodo 1990-2009, molti paesi europei non hanno rispettato i limiti per uno o più inquinanti specifici, fissati dall'accordo fra EU e Nazioni Unite (UN) per il 2010. In particolare ciò è vero per le polveri sottili (PM10 e PM2.5) che al momento sono in Europa gli inquinanti più problematici in termini di pericolosità e salute. Secondo la World Health Organization (WHO), circa l'80-90% della popolazione europea è esposta a concentrazioni di polveri sottili superiori a quella ritenuta dannosa per la salute. Secondo i limiti europei invece questa percentuale non supera il 18-40% dei cittadini. Tutto ciò si traduce in una diminuzione dell'aspettativa di vita all'interno dell'Unione Europea, pari a 8,6 mesi. All'interno dell'EU, fra i più grandi paesi esposti alle polveri sottili troviamo l'Italia e la Polonia. Per il settore dei trasporti, lo standard "Euro" regola le emissioni di CO, NOx, NMVOC e di PM primario. Le emissioni non allo scarico, quali quelle dovute all'usura di pneumatici, freni e asfalto, non sono attualmente regolate. Esse ammontano a circa il 60% delle emissioni di PM10 "allo scarico" e il 30% di PM2.5. Alcuni studi valutano che una quota compresa fra il 10-20% delle poveri sottili in ambito urbano possano derivare da queste forme di usura: ci si può quindi ragionevolmente attendere un intervento legislativo in questo senso.
Il tema della riduzione dei consumi degli autoveicoli, quindi, sotto la spinta normativa ed del mercato (costo del combustibile sempre crescente) e la continua richiesta di incremento delle prestazioni legate alla sicurezza, costituiscono due dei maggiori driver per l'evoluzione della progettazione delle vetture dei prossimi anni.
Queste esigenze possono essere soddisfatte solamente con un'attività che porti ad una progettazione aperta a nuove soluzioni innovative, ma che possa anche poter disporre di nuovi materiali più prestazionali. Nell'ottica di mantenere la competitività nei confronti delle nuove realtà produttive internazionali, è fondamentale tenere in massima considerazione l'aspetto dei costi. In quest'ottica l'elemento innovativo di grande sfida è quello di ricercare nuove combinazioni di materiali e nuove tecnologie produttive che, con prestazioni incrementate rispetto agli attuali materiali, possano garantire dei costi inferiori agli attuali.
Gli obiettivi da raggiungere (trasformazione industriale verso prodotti e processi ad alto valore aggiunto) presentano un elevato livello di rischio imprenditoriale a causa della complessità degli aspetti produttivi e tecnologici, della necessità di una forte competenza e aggiornamento su tutti gli aspetti legati ai materiali, di un'efficace integrazione delle soluzioni individuate in architetture veicolistiche di grandi e piccole dimensioni, della necessità di attrezzamento specifico di infrastrutture e veicoli, della molteplicità degli attori coinvolti.

Benefici in caso di successo:
sul piano economico
rafforzamento sul mercato della componentistica (fusioni, estrusioni), della produzione di materiali (acciaierie) e dell'azienda automobilistica nazionale, basato sull'innovazione di prodotto.

sul contesto ambientale e sul piano sociale
riduzione delle emissioni di CO_2, dei consumi dei veicoli e del numero di morti o di feriti con danni permanenti in conseguenze agli incidenti stradali.

sull'occupazione

incremento dell'occupazione ad elevata specializzazione con riferimento ai settori della componentistica di componenti metallici. Al fine di assicurarsi una quota notevole di produzione manifatturiera della futura economia guidata dalla conoscenza.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

L'industria dei metalli, con ciò intendendo la produzione del metallo primario, la sua alligazione e tutti i processi a valle, fino al riciclo, costituisce il 46% di tutto il valore sviluppato dalla manifattura europea e contribuisce all'11% del prodotto interno lordo di tutta l'UE. L'industria sia nazionale sia europea ha quindi tutte le capacità di ricerca, sviluppo e industrializzazione necessarie per raggiungere gli obiettivi per creare materiali innovativi e per sviluppare i processi relativi supportata, contestualmente, da ottime conoscenze di analisi, simulazione, progettazione di strutture garantendo le prestazioni richieste dalle normative e dalla Good Engineering (handling, consumi, crash, ecc.).

A livello europeo alcune aziende automobilistiche (es. Renault, VW,.) stanno esplicitamente utilizzando la sicurezza, i consumi e le emissioni in atmosfera come caratteristiche distintive del prodotto, anticipando soluzioni innovative, in quanto supportati da centri eccellenti di ricerca e dalla componentistica. Tutte le principali industrie automobilistiche europee sono stimolate a impegnarsi nella ricerca sui temi sopra elencati, sino a occupare un ruolo dominante a livello mondiale in tale settore.

A questo fine lo stato dell'arte dei materiali compositi merita uno studio più approfondito: tutti i principali produttori di vetture in settore automotive non solo di nicchia ma anche di larga produzione hanno approcciato il materiale composito in qualche sua forma (termoplastico, termoindurente, con rinforzo carbonio, vetro ...), facendo studi di fattibilità, prototipi, produzioni. Questo non solo in ambito automotive ma anche industriale, treni, energia, per cui si potrebbero trovare sinergie di ricerca di processi e materiali innovativi e sostenibili.

Lo stato dell'Arte del titanio merita una descrizione più approfondita. ITP (International Titanium Powder) ha ormai reso il processo di produzione di polveri di Titanio CP (basati su brevetto Armstrong) una realtà industriale. Case costruttrici di veicoli, come Toyota, stanno investendo molte risorse nello studio della fattibilità di componenti auto realizzati in Ti. Il settore ferroviario e dei trasporti su gomma (heavy truck), ha messo a punto ormai da tempo l'applicazione di pannelli in Al e Ti ottenuti per formatura superplastica. Alcuni esempi di applicazione sono le pareti laterali finestrate e di accesso della metro di Stoccolma, le 2600 poltrone dell'Heathrow Express, e tutto il cofano anteriore di un truck FORD (mercato statunitense). Il processo è vantaggioso e applicabile per relativamente bassi volumi di produzione: più il pezzo è complesso e integrato e più grande è la superficie e maggiori sono i vantaggi. Mutuando opportunamente la tecnologia da questi settori al settore automotive, su nicchie di mercato con volumi di produzione compatibili con la tipologia di processo, è possibile ottenere componenti di geometria complessa. Il vantaggio dell'applicazione della formatura superplastica risiede nella possibilità di integrare in un unico componente più elementi giuntati insieme ottenuti da processi tradizionali. Ne possono derivare vantaggi in termini di riduzione di peso, incremento della rigidezza dell'assieme, riduzione del nu-

mero di parti singole, riduzione di operazioni di assemblaggio. Dal punto di vista del costo attrezzatura, si può considerare che per un componente auto come uno sportello, e per serie di qualche migliaio di pezzi, la differenza di costo degli stampi per SPF non supera il 5% rispetto agli stampi a freddo, ma le forme ottenibili sono molto più complesse. Il costo di una pressa corredata del sistema di controllo della pressione per la formatura superplastica con una tavola da 1 m^2 ha un costo di circa 1-1.5m .

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

120 milioni di euro

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 5

TECNOLOGIE DELL'AUTO CONNESSA PER UNA MOBILITÀ EFFICIENTE, ECOLOGICA E SICURA

Il piano d'azione nazionale sui sistemi intelligenti del trasporto (ITS) ha identificato le priorità della ricerca e dell'innovazione in linea con la direttiva ITS del 2010/40/EU. Queste priorità includono l'uso ottimale dei dati relativi al traffico e alla mobilità, la continuità dei servizi ITS di gestione del traffico e del trasporto merci, le applicazioni ITS per la sicurezza stradale e per la sicurezza del trasporto e il collegamento tra i veicoli e l'infrastruttura di trasporto. In aggiunta l'orientamento di sistema e tecnologico è quello di integrare ai sistemi intelligenti di trasporto le tecnologie cooperative cosiddette V2X (veicolo verso qualunque cosa).

I sistemi per C-ITS (Cooperative Intelligent Transport Systems) applicano le informazioni e le tecnologie di comunicazione al trasporto. Sistemi elettronici e di calcolo avanzati, connettività e sensori stanno giocando un ruolo di crescente importanza nel nostro sistema dei trasporti. Allo stesso tempo le tecnologie di connettività sono utilizzate in campi applicativi molto diversi fra loro, dal trasporto al medicale, alla domotica al mondo consumer, così come vengono applicati ad ogni modalità di trasporto, dal treno, all'aereo alle navi e ai veicoli. In ogni caso è il mondo consumer che ha guidato e sta guidando la straordinaria evoluzione tecnologica delle ultime due decadi, un'evoluzione tecnologica che ha i connotati di una vera rivoluzione che ha cambiato le vite di ogni giorno di tutti noi. Proprio ad esempio dalla famiglia Wi-Fi oppure dalla evoluzione degli standard cellulari che deriveranno le tecnologie per la connettività V2X.

In parallelo a questo cambiamento i sistemi per la gestione della mobilità stradale hanno integrato tecnologie informatiche e di telecomunicazione sempre aggiornate non solo per migliorare le prestazioni delle funzionalità, ma soprattutto per creare le basi di una mobilità sicura, efficiente e a minimo impatto ambientale per le persone e per le merci.

I sistemi C-ITS possono essere classificati in modi diversi a seconda del punto di osservazione che può essere tecnologico, o dei servizi, o del settore di applicazione. Un modo per rappresentarli è quello di seguire l'C-ITS Action Plan della Commissione Europea che definisce gli C-ITS come integrazione fra le telecomunicazioni, l'elettronica e le tecnologie dell'informazione con l'ingegneria dei trasporti al fine di pianificare, progettare, rendere operativi, sottoporre a manutenzione e gestire i sistemi di trasporto. In particolare l'C-ITS Action Plan ha proposto una serie di azioni relative alla fornitura di servizi informativi sul traffico e sulla circolazione, servizi che comprendono:

- C-ITS paneuropeo per lo scambio in tempo reale di informazioni sul traffico merci e passeggeri,
- C-ITS nazionali multimodali per la programmazione degli itinerari, sistemi cooperativi da infrastruttura a infrastruttura (I2I), tra veicolo e infrastruttura (V2I) e tra veicoli (V2V),
- C-ITS a supporto del trasporto merci eFreight, sistemi di telepedaggio interoperabili,
- C-ITS avanzati di assistenza al conducente e per la sicurezza, eCall paneuropea,

- C-ITS per la sicurezza e il confort degli utenti vulnerabili,
- C-ITS per i parcheggi e per le aree di sosta.

Le azioni previste dall'C-ITS Action Plan comprendono, fra le altre cose, uno scambio di informazioni di carattere paneuropeo e in tempo reale sul traffico merci e passeggeri, la continuità dei servizi C-ITS per i passeggeri e le merci nei corridoi di trasporto e nelle aree urbane e interurbane, un'architettura quadro degli ITS europei, attualizzata e multimodale, un'architettura per una piattaforma telematica istallata nel veicolo per la fornitura dei servizi e applicazioni C-ITS, la raccolta e fornitura di dati relativi alla circolazione stradale e ai piani di circolazione del traffico, una garanzia sulla sicurezza e la protezione dei dati personali.
I servizi C-ITS possono essere realizzati come combinazione di alcune funzionalità di base che vengono opportunamente adattate per essere poi implementate in contesti differenti e per essere facilmente aggiornabili. In merito all'evoluzione dei sistemi C-ITS, un passo in avanti si sta facendo nell'integrazione di nuovi canali di acquisizione e distribuzione delle informazioni di mobilità. Come anticipato in questo contesto un ruolo fondamentale sta assumendo e sempre più assumerà l'auto connessa. In un contesto di mobilità connessa e cooperativa i veicoli, l'infrastruttura stradale e i centri di controllo del traffico possono scambiarsi informazioni che sono essenziali per migliorare la sicurezza sulle strade, ridurre la congestione del traffico e minimizzare i consumi energetici. Il veicolo connesso è in grado di ricevere e/o trasmettere informazioni verso il mondo esterno. Nell'ultima edizione avevamo fatto un excursus sulle prime attività di ricerca relative all'auto connessa ed ai primi sistemi telematici adottati dalle case automobilistiche quali il sistema di posizionamento GPS e i sistemi di telecomunicazione GSM (Global System for Mobile Communications). Le prossime frontiere in tal senso saranno rappresentate dall'utilizzo in auto sia della tecnologia di localizzazione Galileo, che combinata con gli altri sistemi globali e regionali permetteranno di raggiungere accuratezze submetriche, sia della tecnologia cellulare 5G che grazie alle sue capacità della rete aprirà all'utilizzo della connettività ad altri domini automotive quali la guida automatica.
Rimane inalterata la crescente integrazione con il mondo consumer, le piattaforme telematiche odierne possono essere o diventare modulari dal punto di vista delle tecnologie di localizzazione e capacità di elaborazione e memorizzazione delle informazioni. Tali piattaforme telematiche sono quindi alla base dei sistemi di informazione e di mobilità (ovvero di infomobilità) in quanto permettono di integrare informazioni relative alla viabilità con una tempistica quasi continua e una copertura più capillare, permettendo allo stesso tempo l'accesso ai social network e ad altre applicazioni (o APP, come vengono chiamate nel mondo consumer) di interesse per il guidatore e per gli occupanti del veicolo.
Telefoni cellulari di ultima generazione (5G nel prossimo futuro), smart phone e tablet, consentono collegamenti a larga banda verso il mondo internet e sono pertanto in grado di offrire soluzioni di mobilità attraverso l'accesso a portali. Navigatori integrati sui veicoli oppure disponibili nel cloud consentono di calcolare percorsi di navigazione basati su dati statistici e/o storici di traffico oppure sono in grado di aggiornare in tempo reale il percorso in quanto integrano un terminale di comunicazione.

Lo sviluppo in questo settore di elettronica consumer sempre più sofisticata e con interfacce sempre più performanti, diventa un'opportunità per utilizzare in modalità "remota" informazioni e applicazioni creando un unico ambiente in cui interagire con il veicolo, un ambiente dove i dispositivi consumer e l'unità telematica di bordo agiscono in rete locale e in rete connessa con gli attori esterni al veicolo in una modalità integrata.
L'intersezione fra la rete connessa di bordo veicolo e la connettività del veicolo verso il mondo esterno apre la strada al tema fondamentale della sicurezza cibernetica, tema che sta evolvendo in modo rapidissimo e di pari passo con l'evoluzione delle tecnologie.

Mobilità efficiente ed ecologica

Il concetto di mappe per la navigazione è in rapida evoluzione, si passa da mappe statiche a mappe dinamiche, alla possibilità di ricostruire in tempo reale e in modo molto affidabile quanto sta accadendo intorno ad un veicolo in movimento e in particolare prevedere gli eventi di traffico sulla traiettoria del veicolo. In questo modo il navigatore si trasforma in uno strumento dinamico utile non solo alla selezione della traiettoria più opportuna in quel momento e alla stima del tempo di percorrenza, ma usabile come un nuovo paio di occhi posti ben oltre l'orizzonte di visibilità del veicolo, introducendo così il concetto dell'orizzonte elettronico.
Naturalmente la robustezza degli orizzonti elettronici del futuro e la loro affidabilità dipenderanno dal livello di integrazione e di gestione dei dati che vengono generati dai veicoli, dall'infrastruttura stradale, dai centri di controllo del traffico e dalla loro gestione in locale e in rete, nonché dall'evoluzione dei sistemi di localizzazione che aumenta l'integrità della localizzazione.
Quindi il veicolo del futuro si muoverà in modo contestualizzato e potrà anche abilitare su richiesta la disponibilità di informazioni puntuali su specifici punti di interesse.
Veicoli che si muovono in modo "consapevole" rispetto allo scenario di traffico, al meteo, al contesto di guida, permetteranno a breve una rapida evoluzione dei sistemi per la guida a risparmio energetico. Avevamo descritto nell'ultima edizione della funzionalità eco:Drive lanciata sul mercato da FCA, che permette di visualizzare in tempo reale lo stile di guida sul display della vettura, come un personal trainer di guida virtuosa.. In generale l'evoluzione delle tecnologie relative al veicolo connesso stanno aprendo le porte alla realizzazione della nuova generazione di sistemi di guida-eco evoluti, ovvero in grado, ad esempio, di utilizzare mappe dinamiche sempre aggiornate e dotate di tutte le informazioni che sono essenziali per poter offrire i servizi che aiutano il guidatore ad adottare uno stile di guida efficiente dal punto di vista dei consumi.
L'avvento delle vetture elettriche siano esse puramente elettriche siano ibride richiederà di riconsiderare le logiche di pianificazione e di utilizzo dei sistemi di navigazione e delle relative informazioni provenienti dai sistemi ITS. Il calcolo ottimo del percorso dinamico e l'utilizzo dello stesso per l'attuazione delle strategie delle modalità puramente elettriche consentiranno da un lato di ridurre l'ansietà del driver incentivandone la diffusione delle vetture elettriche, dall'altro di ridurre i fattori inquinanti in determinati scenari stradali ad esempio quali aree urbane.

Mobilità sicura

L'evoluzione dei sistemi di assistenza alla guida vede oggi sul mercato la disponibilità di diversi

sistemi per la sicurezza preventiva che sono basati su sensori. L'integrazione delle informazioni derivanti dai sensori e dai sistemi cooperativi (di scambio dati fra veicoli e fra veicoli e infrastruttura) è oggi possibile dal punto di vista tecnologico.
Tuttavia il successo della comunicazione veicolare applicata alla sicurezza richiede notevoli investimenti e sforzi coordinati di tutte le parti interessate. In caso contrario, i vantaggi che possono derivare da questa tecnologia non possono essere realizzati. La chiave del successo è una tabella di marcia concordata, che definisce le misure necessarie per l'introduzione sul mercato. Al fine di raggiungere questo accordo, tutti i soggetti coinvolti necessitano di una visione chiara sui costi per l'implementazione del sistema, nonché sui benefici e i potenziali ricavi generati dalla comunicazione veicolare.
Da questo punto di vista le sperimentazioni avviate in ambito Italiano ed internazionale della tecnologia 5G auspicabilmente potranno dare un riscontro sulla fattibilità tecnico – economica della applicazione della connettività per scopi di sicurezza stradale e guida autonoma.

Roadmap wireless

La disponibilità di reti di comunicazione a corto-medio raggio con un canale dedicato ed efficiente, di reti cellulari a larga banda e di nuova generazione, l'integrazione con il mondo di internet, con mappe avanzate e con il mondo consumer apre un nuovo orizzonte per i servizi e le funzioni telematiche in generale, non solo per il guidatore e gli occupanti dei veicoli, ma per tutti gli attori coinvolti nella gestione e nella fruizione della mobilità, affrontando in modo sistematico e integrato le sfide legate all'ottimizzazione dei tempi di viaggio, sia esso mono- o multi-modale, di riduzione dei consumi energetici e di incremento della sicurezza per tutti gli utenti della strada.
La rete connessa della mobilità che si stabilisce fra i diversi attori del traffico prevede un approccio che potremmo definire come "ibrido", mediante l'utilizzo di tecnologie di comunicazione a corto raggio (quali ad esempio IEEE.802.11p, la cui standardizzazione per l'utilizzo in ambito mobilità sicura è stata deliberata dall'ETSI TC ITS) e tecnologie cellulari, con un occhio attento alle nuove generazioni 4G/LTE, mentre 5G è previsto ma non prima del 2022.
A tal proposito si riporta la roadmap degli standard delle tecnologie cellulari e la relativa introduzione sul mercato definita dall'ente di standardizzazione 3GPP. Il Third Generation Partnership Project è un accordo di collaborazione (1998) fra enti che si occupano di standardizzare sistemi di telecomunicazione in diverse parti del mondo.
La rete di mobilità dovrebbe essere realizzata in modo da abilitare sia lo scambio di dati essenziali per la sicurezza preventiva degli incidenti stradali sia per migliorare le condizioni di traffico, mentre ulteriori servizi personalizzati per gli utenti dovranno essere messi a disposizione generando un traffico dati che non solo dovrà avvalersi delle nuove tecnologie cosiddette di "big data" (per la gestione di enormi moli di dati) e di "cloud computing" (per lo stoccaggio e lo scambio dei dati) ma dovrà anche prevedere, almeno in prima battuta, l'utilizzo di diversi canali di comunicazione a seconda delle esigenze specifiche delle applicazioni o dei servizi. Inoltre, facendo un uso ottimale di diversi canali di comunicazione sarà anche possibile gestire la rete di mobilità a livello centralizzato, ad esempio per mezzo di centri di controllo del traffico per evitare blocchi stradali o per ottimizzare l'intervento di veicoli di emergenza.

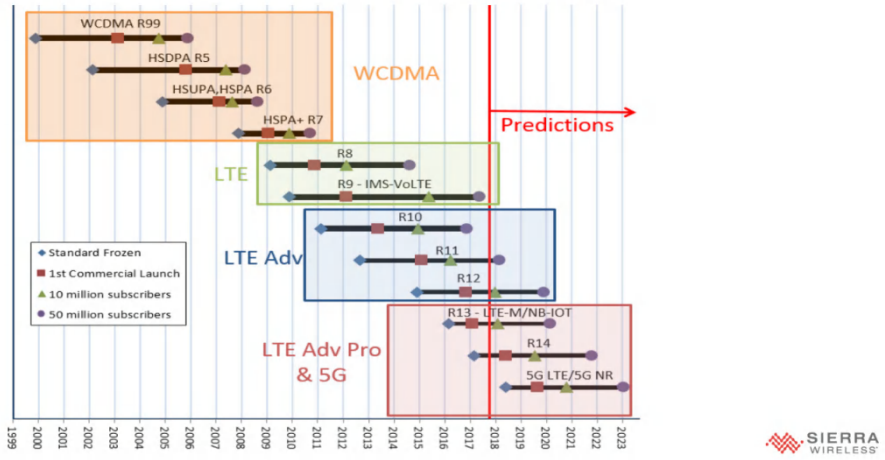


FIGURE 1 - TEMPISTICHE DI RILASCIO DEL 3GPP

FCA sta già operando nella direzione del veicolo connesso offrendo sul mercato a livello globale l'unità di bordo Uconnect che offre tutta una serie di servizi connessi per la navigazione, la telefonia e l'intrattenimento. Ad esempio Uconnect sta collaborando con i leader sulla navigazione (quali TomTom in Europa) e SiriusXM per permettere ai guidatori dei veicoli di sapere dove si trovano, dove stanno andando, e quanto tempo ci vorrà per arrivarci. Mappe ben studiate consentono di muoversi in modo efficiente nel traffico, mentre indicazioni audio e messaggi vocali forniscono informazioni per la guida passo-per-passo e permettono di identificare i punti di interesse in modo rapido con una grafica 3D e con visualizzazioni dettagliate.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Come citato dalla Commissione Europea (Direttiva 2010/40/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio sul quadro generale per la diffusione dei sistemi di trasporto intelligenti nel settore del trasporto stradale e nelle interfacce con altri modi di trasporto) i progressi realizzati nel campo dell'applicazione delle tecnologie dell'informazione e della comunicazione dovrebbero tradursi in sviluppi nel settore del trasporto stradale. In particolare questo documento della Commissione Europea sottolinea che in un certo numero di Stati Membri sono già in uso alcune soluzioni nazionali di tali tecnologie nel settore del trasporto stradale. Tuttavia, la loro diffusione frammentaria e non coordinata rende impossibile la continuità geografica dei servizi ITS in tutta l'Unione e alle sue frontiere esterne.

Sempre in contesto Europeo la strategia Europea per trasporti per il 2020 comprende in sintesi tre priorità fra loro intersecate:

- una "crescita intelligente" con lo sviluppo di una economia basata sulla conoscenza, sull'innovazione e sulla società digitale,
- una "crescita sostenibile" a basso impatto ambientale a risorse efficienti e ad alta competitività economica,
- una "crescita inclusiva" che preveda una economia a crescente tasso di occupazione.

In uno scenario di crescente domanda di mobilità e di crescita demografica, in particolare nelle grandi città che stanno diventando mega-città, una mobilità efficiente e sicura delle persone e delle cose è un target fondamentale su cui non può operare un singolo stakeholder pubblico o privato. Oggi i dati relativi al congestionamento delle strade e agli incidenti stradali sono ancora preoccupanti, per quanto importanti passi avanti siano stati fati nella scorsa decade. In questo scenario i sistemi C-ITS rappresentano un essenziale passo avanti che deve portare allo sviluppo di un paradigma di mobilità pan-Europea.
Specifici programmi regionali, nazionali ed Europei sono necessari per portare avanti attività di ampio respiro per garantire in primo luogo l'interoperabilità transfrontaliera dei sistemi C-ITS e una loro diffusione capillare. La partecipazione di attori industriali (quali ad esempio costruttori di veicoli, gestori del traffico, fornitori di tecnologie, ...) della ricerca e della pubblica amministrazione è una condizione essenziale per creare piani di sviluppo e di business sostenibili e vantaggiosi per tutti, migliorando la competitività in Europea con importanti ricadute anche sull'occupazione.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

La straordinaria rapidità con cui si evolve (ad esempio) la tecnologia consumer e in generale le tecnologie telematiche che afferiscono al veicolo e alla mobilità connessa fa sì che più che di stato dell'arte si possa parlare di direzioni verso le quali la ricerca e l'innovazione si stanno muovendo.
In questo scenario è importante menzionare che per quanto riguarda i servizi telematici relativi al traffico oggi l'attuale diffusione sul mercato è ancora limitata, un certo numero di soluzioni locali sono disponibili ma non ancora come sistemi integrati, nello specifico per quanto riguarda il sistema di chiamata di emergenza della eCall.
Per quanto riguarda i sistemi di navigazione la tendenza si muove nella direzione di una navigazione connessa per poter usufruire di mappe digitali aggiornate anche con dati che possono essere utili nel percorso di marcia. Allo stesso tempo, per quanto riguarda i sistemi di localizzazione, nel 2018 il programma Europeo Galileo ha lanciato in orbita gli ultimi 4 satelliti che hanno completato la costellazione di 26 satelliti per la piena operatività (altri 4 satelliti di scorta saranno lanciati per arrivare ai 30 satelliti originariamente pianificati) permettendo ai sistemi di localizzazione di migliorare l'accuratezza della posizione.
Per quanto riguarda le tecnologie per i sistemi cooperativi basati su comunicazione veicolo-veicolo e veicolo-infrastruttura (V2V e V2I, o V2X in breve), come menzionato, il processo di standardizzazione è in fase di finalizzazione presso l'ETSI TC-ITS, l'allocazione della banda di frequenza in Europa è stata effettuata anche grazie all'attività del consorzio Car-to-Car Communication, costituito da case automobilistiche e fornitori di sistemi, che ha contribuito alla specifica dello standard per la comunicazione su tecnologia wireless della famiglia Wi-Fi (IEEE.802.11.p).
Questa tecnologia di comunicazione combinata con sensori installati sui veicoli (quali ad esempio radar o telecamera) potrà estendere il margine di sicurezza preventiva intorno ai veicoli permettendo la segnalazione di eventi legati al traffico, alla presenza di lavori stradali o altro.
La connettività V2X basata su tecnologia Wi-Fi dovrà confrontarsi con quella basata su tecnologia cellulare 5G che in tal senso prevede di ridurre i tempi di latenza nella trasmissione dei dati,

di aumentare la banda di trasmissione dei dati e non meno importante la gestione massiva dei terminali di comunicazione. L'associazione 5GAA (5G Automotive Association) si è data come missione di sviluppare, sperimentare e promuovere le soluzioni di comunicazione quali il 5G appunto fornendo input ai tavoli di standardizzazione per poter accelerare l'introduzione della tecnologia nel mercato. L'obiettivo della associazione è quella di definire applicazioni in ambito mobilità connessa e sicurezza stradale in grado di integrarsi in contesti di smart mobility e intelligent transportation.

Sul tema delle tecnologie telematiche dell'auto applicate ai sistemi di mobilità molto è stato fatto nell'ultimo decennio. Dati di navigazione, punti di interesse (ristoranti, stazioni di rifornimento, ...), accesso ai social network, linee di traiettoria dinamica, veicoli che comunicano fra di loro e che accedono a tutta una serie di servizi utili per chi guida e per chi è nell'abitacolo, alleanze strategiche con partner quali Google e Apple, sono realtà che si stanno rapidamente espandendo sul mercato. Tecnologie telematiche avanzate, nuovi dispositivi di presentazione delle informazioni al guidatore che minimizzano i rischi di distrazione, soluzioni di sicurezza cibernetica e di trattamento dei dati, che tiene conto fra le altre cose di una gestione attenta della privacy, potranno presto essere una realtà di tutti i giorni, lo sono già in parte sui veicoli di oggi, lo saranno ancora di più sui veicoli del futuro.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

70 milioni di euro

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 6

SOLUZIONI & TECNOLOGIE PER L'INTERAZIONE UOMO MACCHINA (HMI)

Nel settore trasporto si sta assistendo alla crescita di funzioni e sistemi che possono aiutare il guidatore nel compito di guida, ma anche essere una potenziale distrazione alla guida stessa:

- crescente ricchezza di informazioni sullo stato del veicolo, rese disponibili da sistemi di controllo del veicolo e diagnostici in continua evoluzione;
- sistemi di intrattenimento (radio, CD, MP3, web) ricchi e versatili, con possibilità di regolazione e personalizzazione;
- connessione a sistemi telematici, dalla telefonia cellulare a servizi e applicazioni (es. informazioni sul traffico, servizi ed esercizi commerciali, ecc.);
- servizi e applicazioni che consentono al driver di interagire con differenti funzioni proprie della connettività della Consumer Electronics (CE), quali Tablet, smartphone, smartwatch, ecc.;
- sistemi di navigazione evoluti che supportano il guidatore nell'effettuazione efficiente e confortevole del viaggio;
- sistemi di ausilio alla guida che intervengono o informano il driver in situazioni potenzialmente pericolose o lo supportano con l'automazione di alcune operazioni.

Questa crescita di funzioni e componenti richiede uno sviluppo che favorisca l'usabilità dei componenti e una progettazione che presidi la potenziale della distrazione del guidatore al fine di ridurre incidenti.
È quindi sempre più urgente passare da un approccio tradizionale, basato sull'aggiunta di funzioni a un approccio integrato, olistico dell'HMI, in cui, analogamente a quanto avvenuto nel mondo della consumer electronics, l'utente possa interagire nella maniera più usabile e naturale possibile.
Una sfida particolarmente rilevante è garantire l'usabilità, la funzionalità e la minima distrazione a tutta l'utenza, siano i driver giovani o anziani, più "tecnologici" e quindi abituati nella vita fuori dal veicolo ad usare dispositivi CE di ultima generazione ma anche utenti che rigettano la tecnologia, persone che possono avere criticità nell'interazione dovuta a problemi fisici o cognitivi.

Altri due aspetti particolarmente importanti riguardano:

- l'attenzione ai costi, in particolare per poter estendere l'applicazione di tecnologie avanzate di HMI alla fascia utilitaria;
- l'opportunità di utilizzare tecnologie emergenti o provenienti da settori diversi, se si dimostra che possono meglio contribuire agli obiettivi sopra descritti. Esempi rilevanti sono l'inte-

razione vocale naturale e l'uso della comunicazione gestuale (movimenti delle mani, espressioni facciali, sguardo), nonché l'utilizzo di superfici touch, abbinato a feedback aptici o acustici.

La strategia vuole quindi garantire la flessibilità di prodotto e di modalità di interazione a seconda di quanto l'utilizzatore voglia avere un sistema dedicato sull'auto o utilizzare il suo dispositivo nomadico per controllare e comandare le funzioni. Nasce quindi l'opportunità di sviluppare una nuova generazione di dispositivi compatti nelle dimensioni ed economici nei costi, per affrontare in modo innovativo le problematiche di riconfigurazione, diagnostica, connessione nel settore auto. Il sistema sviluppato dovrà rispondere ai seguenti 3 pillar:

- deve essere portabile, scalabile e trasversale;
- deve essere dotato di un'elevata potenza di calcolo, ampia memoria e deve essere in grado di instaurare un canale di comunicazione bidirezionale tra macchina ed utilizzatore;
- deve essere "connesso" al cloud, e quindi consentire funzionalità e applicativi propri del mondo connesso.

Per questi motivi, aree prioritarie di sviluppo delle conoscenze e delle capacità dell'industria nazionale del settore appaiono essere:

- architetture modulari ed espandibili per consentire: l'implementazione di interfacce semplificate per prodotti della fascia utilitaria e l'integrazione di dispositivi personali, che possano essere utilizzati in modo sicuro anche durante la guida.
- sistemi di gestione adattativa delle informazioni da scambiare col guidatore, che selezionino e accodino le informazioni in termini di urgenza e priorità e siano in grado di selezionare il canale comunicativo, cosi da modulare la complessità in funzione della situazione di guida. La frontiera degli sviluppi dovrà portare all'adattamento dell'interazione in base allo stato psico-fisiologico dell'utente, tenendo conto anche dell'aspetto emozionale.
- sistemi di riconoscimento dei gesti, sia in termini di movimenti, sia in termini di semantica associata, in modo da consentire libertà nell'impartire i comandi, riducendo nel contempo il numero di dispositivi fisici.
- sistemi di interazione multimodale che possano consentire di impartire comandi e ricevere conferme o ulteriori richieste senza una grammatica predefinita, ma lasciando all'utente la libertà di attuare i comandi nella forma più usuale e preferita. L'idea è poter interagire con i sistemi nella modalità più utile ed efficace momento per momento, in analogia alla comunicazione interpersonale, non essendo quindi obbligati a iniziare e terminare un'azione complessa con una sola modalità.
- sistemi per il *feedback* attivo di forza su comandi o superfici (sistemi aptici), sia per fornire informazioni tramite il canale tattile e propriocettivo (ad esempio per l'ausilio al mantenimento della corsia), sia per fornire una retroazione corretta in caso di comandi virtuali (ad esempio realizzati mediante *touch screen*).
- nuovi sistemi per visualizzazione di informazioni –head up display con integrazione di soluzioni di augmented reality, per la rappresentazione di informazioni sovrapposte alla sce-

na esterna e per la messaggistica di informazioni rilevanti nei differenti contesti di guida. Si pensi ad esempio a indicazioni di svolta "proiettate" direttamente sulla strada.
- nuove soluzioni per i comandi secondari, passando dall'attuale predominanza di sistemi elettromeccanici, a tecnologie quali ad esempio comandi a sfioramento, contatti capacitivi, tessuti funzionali sensibili al tocco, che aprano opportunità di innovazione funzionale ed estetica.

Oltre a queste tecnologie, appare rilevante per abilitare l'eccellenza nell'integrazione di sistema la disponibilità di sistemi per la simulazione funzionale e lo sviluppo integrato HW / SW condiviso fra costruttore e fornitore, che includano:
- la possibilità di effettuare valutazioni con utenti in fase di sviluppo (*virtual prototyping*);
- vista la rilevanza della parte SW, la possibilità di esportare direttamente le logiche e la grafica dagli ambienti di sviluppo al sistema *target* (*rapid prototyping*);
- la possibilità di inserire regole e verifiche ergonomiche nell'ambiente di sviluppo, in modo da impedire o avvisare lo sviluppatore di problematiche e violazione di euristiche HMI.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Le tecnologie HMI evolvono nel mondo consumer ad una velocità tale da rendere necessario nel mondo dei trasporti definire e gestire un modo innovativo di progettare, programmare e poi produrre dispositivi che riescano a riportare nel mondo automotive le modalità di interazione del mondo consumer.
Inoltre è necessario rispondere in modo efficace alla crescente ricchezza di funzioni e di necessità di interazione mediante un'offerta di prodotti e soluzioni per l'HMI, cogliendo le opportunità per valorizzare le capacità nazionali e la rete eccellente di aziende di conoscenza e manifatturiere italiane:
- evitando di accrescere la complessità del sistema HMI e del carico di lavoro del guidatore, anzi riducendola con l'applicazione di dispositivi e sistemi di gestione che consentano un'interazione naturale e intuitiva;
- facendo leva sulla capacità di sviluppare e commercializzare prodotti eccellenti e distintivi.

Per queste ragioni, si ravvisa l'opportunità di supportare la rete industriale nazionale ad acquisire e mantenere un presidio di eccellenza nel settore, favorendolo mediante lo sviluppo sia di prodotti e componenti distintivi, sia mediante le capacità di integrazione di sistema a livello di prodotto e di processo. In questo modo, oltre a ridurre la dipendenza dall'estero della nostra industria dei trasporti, si incrementa la competitività dei fornitori nazionali verso le maggiori nazioni costruttrici, in particolare europee.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Le tecnologie HMI costituiscono un punto di distintività per i costruttori e una ragione di acquisto per i clienti.
I costruttori si dividono in innovatori dell'HMI ma con scelte non sempre convincenti dal punto di

vista ergonomico e di usabilità, e "conservatori" che standardizzano soluzioni e le ripropongono trasversalmente sui loro prodotti di ogni segmento.
I costruttori extraeuropei, in particolare giapponesi, manifestano la tendenza a soluzioni ricche e tendenzialmente appariscenti, fortemente basate sulle tecnologie *touch* e sulla grafica.
I fornitori di sistemi e componenti, in gran parte europei o con forti basi nell'unione, sono sovente propositivi e ricchi di soluzioni innovative, che spesso sono frenate da considerazioni di costo e standardizzazione da parte del costruttore di veicoli.
In questo conteso l'industria italiana ha sempre manifestato un approccio di tipo *follower*, sia per i segmenti di massa, sia per le fasce *premium*, giocando la distintività principalmente sulle doti veicolistiche, stilistiche e di comfort.
Un'eccezione ragguardevole è costituita dalla telematica, in cui l'industria italiana ha realizzato e proposto dapprima il Blue & Me, primo sistema vocale per la comunicazione e l'intrattenimento, basato su standard industriali e completamente integrato nel veicolo e nella sua HMI. I sistemi più recenti (Uconnect nelle piattaforme VP) ora presenti hanno avuto inoltre l'apprezzamento degli utenti per la progettazione HMI e per la facilità di utilizzo, ma non integrano ancora la consumer electronics e le funzioni del mondo delle "app".
Inoltre, l'attività di ricerca in ambito europeo e nazionale da parte della realtà nazionale (progetti come SPARC, PREVENT, INTERACTIVE, GAIN) ha certamente abilitato alla prontezza nella messa in produzione dei sistemi HMI avanzati.

Per queste ragioni, è indispensabile per garantire la competitività del prodotto intraprendere iniziative che consentano all'industria nazionale di acquisire una leadership sistemistica e produttiva nel settore delle interfacce puntando ai seguenti obiettivi strategici:

- capacità di integrare nella maniera migliore i sistemi di ausilio alla guida;
- gestire in modo sicuro ed innovativo l'integrazione con il mondo consumer;
- essere leader nella capacità di progettare sistemi poco distraenti;
- disegnare l'HMI di veicoli che maggiormente integrano funzioni di guida semi-automatica.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

60 milioni di euro

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 7
EFFICIENZA ENERGETICA

Il nuovo "Energy Plan" della Commissione Europea pone l'accento sulle sfide energetiche ed ambientali che ci attendono: entro il 2020, l'Europa dovrà ridurre del 20% le emissioni dei gas serra rispetto al 1990; dovrà migliorare del 20% l'efficienza di utilizzo delle fonti energetiche e le fonti energetiche rinnovabili dovranno coprire il 20% dei fabbisogni.
Il 14 giugno 2018 la Commissione, il Parlamento e il Consiglio hanno raggiunto un accordo politico che include un obiettivo vincolante di efficienza energetica per l'UE per il 2030 del 32,5%, una riduzione dei gas ad effetto serra del 40% ed una quota di produzione di energie rinnovabili almeno del 27%. È altresì prevista una clausola per una revisione al rialzo di questi obiettivi entro il 2023.
In coerenza con questo intendimento l'Unione Europea chiede ai costruttori di autoveicoli e veicoli commerciali leggeri di ridurre progressivamente le emissioni di CO_2, a livello di flotta del venduto, fino a 95 g/km nel 2020 e 75 g/km nel 2025 (dagli attuali 120-130 g/km).
Gli obiettivi dati dall'Unione Europea sono estremamente sfidanti ed impongono un radicale cambiamento dei criteri di progettazione del veicolo, dei suoi sistemi e più in generale della mobilità di cose e persone in particolare in ambito Urbano. I livelli di emissioni CO_2 richiesti saranno raggiunti:

- con una nuova generazione di veicoli efficienti;
- aumentando in modo progressivo i chilometri medi percorsi senza emettere CO2 di origine fossile;
- con un approccio sistemi che coinvolga tutti gli operatori del settore e che comporta investimenti di carattere infrastrutturale.

Il miglioramento dell'efficienza dei motori e dei sistemi di propulsione e l'alleggerimento, pur se necessari, non consentono da soli di raggiungere tali obiettivi ma è necessario un approccio sistemico che abbracci un perimetro più ampio e che abbia effetto su tutti i componenti e sottoinsiemi che contribuiscono al consumo energetico del veicolo.
A fronte di questa sfida, le soluzioni di motopropulsione ibrida e/o elettrica risultano certamente tra le più efficaci e capaci di apportare un contributo consistente alla riduzione delle emissioni, questo anche alla luce del trend crescente nella produzione di energie rinnovabili.
Per favorire tale sviluppo sarà però necessario sviluppare la filiera dell'elettrificazione attraverso un approccio di sistema, nel quale, a fianco dello sviluppo delle tecnologie veicolari, vengano anche pianificati la rete di distribuzione ed i punti di ricarica, sia come disposizione geografica che come dimensionamento (potenza installata).
L'elemento chiave è rappresentato dalla sostenibilità economica delle innovazioni di veicolo, siste-

ma e mobilità necessarie a ridurre le emissioni come richiesto che dovrà consentire di non deprimere il mercato e garantire ai cittadini ed alle imprese una mobilità migliore e servizi generalmente più efficienti e competitivi.
Pertanto è di cruciale importanza avviare linee ad azioni di ricerca che portino allo sviluppo di una nuova generazione di veicoli dotati di sistemi ausiliari e soluzioni ed architetture di sistema ad elevata efficienza.
L'impatto di tale iniziativa è stimabile in una riduzione ulteriore del consumo pari a circa il 20% considerando un uso reale dei veicoli e con effetti diversi in funzione del tipo di veicolo (automobile, autobus, veicolo industriale ...).
Le linee di ricerca sotto riportate hanno impatto su tutti i veicoli, le motorizzazioni e i sistemi di propulsione (motore termico, ibridi, elettrico ...) e sono elementi sostanziali nel determinare l'efficienza complessiva reale dei veicoli:
Si dovrà operare sia sul fronte dell'impiego dell'energia a bordo del veicolo (termica, elettrica, . . .) sia sul fronte della Vehicle Demand Energy (resistenze aerodinamica e di rotolamento e peso del veicolo), che risulta indipendente dalla tipologia di propulsione.

Vehicle Demand Energy

L'iniziativa include lo sviluppo di metodologie di calcolo, sistemi e componenti atti a ridurre le resistenze aerodinamiche ed all'avanzamento dovuto sia a pneumatici e cuscinetti mozzo-ruota sia al peso del veicolo:

- Metodologie avanzate di progettazione e validazione in ambiente virtuale di soluzioni per l'aerodinamica del veicolo;
- Sistemi attivi per il controllo del flusso e della scia basati su dispositivi in grado di agire sullo strato limite;
- Materiali e trattamenti superficiali in grado di agire sulle caratteristiche aerodinamiche;
- Sistemi attivi per il controllo dei flussi di raffreddamento;
- Pneumatici ottimizzati nelle mescole e nel rapporto di forma per garantire una ridotta resistenza al rotolamento senza compromessi su tenuta e spazi di arresto del veicolo;
- Cuscinetti mozzo-ruota con tenute e grassi specifici per la minimizzazione della resistenza al rotolamento residua.

Integrazione funzionale ed architetturale per l'alleggerimento

L'iniziativa include lo sviluppo di:

- Nuove architetture veicolo modulari finalizzate ai veicoli elettrificati
- Integrazione autotelaio e battery system per garantire prestazioni strutturali e sicurezza crash a peso contenuto
- Tecnologie e materiali innovativi per l'alleggerimento

Sistemi ad elevata efficienza per la gestione termica del veicolo

La gestione termica integrata ed efficiente del veicolo diventa fondamentale sia per la riduzione delle emissioni dei motori endotermici che per aumentare l'autonomia in elettrico del veicolo in

condizioni di funzionamento reale (es. basse temperature ambiente o con sistema di condizionamento attivato).

L'iniziativa include lo sviluppo di:

- scambiatori di calore ad elevata efficienza che sfruttino i risultati della ricerca nel campo dei materiali (plastiche e metalli) e delle nuove tecnologie di produzione basate su additive manufacturing;
- sistemi termici integrati che permettano una gestione e distribuzione efficiente e sinergica del calore al fine di ridurre l'energia per dissiparlo e migliorino l'efficienza dei sistemi raffreddati (es. intercooler, condensatore impianto clima, elettronica, batterie ...);
- sistemi a pompa di calore;
- sistemi di accumulo del calore o del freddo in grado di agire come buffer termici durante alcune fasi della missione veicolo (materiali a cambiamento di fase, materiali adsorbenti...);
- sistemi di pre-condizionamento termico di vettura e componenti per veicoli elettrificati;
- fluidi vettori termici e lubrificanti ad elevate caratteristiche di scambio termico (nano-fluidi);
- tecniche di calcolo avanzate che consentano 'l'ottimizzazione termo fluidodinamica di sistemi complessi al fine di sviluppare sistemi integrati ed i relativi algoritmi di controllo;
- tecnologie per rendere alcune superfici del veicolo in grado di dissipare il calore del motore e degli altri sistemi (scambiatori planari) al fine di ridurre gli scambiatori alettati convenzionali e consentire forme aerodinamicamente più efficienti;
- sistemi di recupero e riutilizzo del calore di scarto basati su conversione del calore in energia elettrica con celle ad effetto seebeck ad alta efficienza (Termo-elettrico) o turbocompound elettrici o sistemi basati su cicli termodinamici Rankine o sistemi di climatizzazione ad assorbimento.

Sistemi di recupero dell'energia cinetica (frenata rigenerativa)

In una missione urbana un autoveicolo deve dissipare sotto forma di calore una parte consistente dell'energia meccanica (30%) prodotta per controllare la velocità di marcia (frenatura).

La progressiva maggior diffusione sul mercato di veicoli ibridi e/o elettrici rende possibile l'utilizzo delle macchine elettriche per la frenatura del veicolo, operando da generatori e potendo così convertire l'energia cinetica del veicolo ed immagazzinarla nel sistema di accumulo (es.: batterie).

Questo intervento può essere effettuato semplicemente in aggiunta alla frenatura garantita dal tradizionale sistema frenante dissipativo, ma per massimizzare la quantità di energia recuperabile e garantire il corretto feeling di frenata del veicolo e la sicurezza, è necessaria l'evoluzione del sistema frenate.

Saranno quindi necessarie attività di sviluppo dedicate alla frenatura rigenerativa ed alla corretta gestione della sua integrazione con quella dissipativa classica attraverso approcci di brake split di diversa complessità ed efficacia (dal "brake overlay" fino al "brake blending"), allo scopo di minimizzare la porzione di frenata a carico del sistema dissipativo rispetto a quella realizzata dal sistema rigenerativo (attraverso le macchine elettriche parte integrante delle diverse architetture

di elettrificazione del veicolo), nel rispetto delle esigenze di sicurezza, comfort e ripetibilità della prestazione frenante.
È pertanto necessario avviare delle linee di ricerca che portino allo sviluppo di:

- Sistemi frenanti abilitanti la frenata rigenerativa a costo limitato
- Strategie di gestione integrate della frenata rigenerativa, con il sistema di propulsione elettrificato per il recupero dell'energia cinetica ed il suo riutilizzo.

Unità ausiliari e Sistemi elettrici - generazione e accumulo

In uno scenario in cui aumenterà il numero di kilometri o di minuti percorsi senza emissioni di CO_2 ed in cui c'è disponibilità a bordo di energia elettrica "decarbonizzata" derivante dai sistemi di recupero, è importante che i sistemi veicolo siamo di fatto sempre più indipendenti dal motore termico e dunque vengano progressivamente elettrificati.
L'iniziativa prevede lo sviluppo di ausiliari elettrici (pompe, climatizzatore, ...) ad elevata efficienza, con elettronica di basso costo ed algoritmi di controllo per la massimizzazione del rendimento.

Tecnologie in-wheel motor (IWM)

La soluzione tecnologica innovativa In Wheel Motor (IWM), porta a un nuovo paradigma nell'utilizzo della motorizzazione sui veicoli stradali; come si può intuire dal nome, l'IWM si può descrivere in modo molto semplice come il posizionamento di un motore elettrico all'interno della ruota.

Questo tipo di soluzione genera diversi vantaggi, che vanno dal risparmio energetico durante l'utilizzo del veicolo che adotta questa tecnologia (eliminazione perdite al differenziale/semiassi/giunti), oltre alla riduzione del numero di componenti richiesti a livello di veicolo, con vantaggi in termini di peso, che inducono un ulteriore beneficio in termini di risparmio energetico durante la marcia del veicolo.
La compattezza di questa soluzione, permette una maggiore libertà di progettazione, nonché un aumento di spazio disponibile che può ad esempio, essere sfruttato per inserire accumulatori ausiliari in veicoli ibridi ed elettrici, piuttosto che dar vita a formule veicolo specializzabili alla mobilità urbana pubblica e/o privata.
La gestione puntuale del controllo della trazione/frenata sulla singola ruota consente inoltre una massimizzazione del recupero dell'energia cinetica in frenata, e la realizzazione di funzionalità di controllo (es.: Electronic Brakeforce Distribution, Torque Vectoring, . . .) coordinando a livello veicolo le unità IWM e migliorando la sicurezza e la stabilità direzionale del veicolo.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Nel prossimo futuro (10-15 anni) l'evoluzione tecnologica dei veicoli sarà guidata dall'evoluzione delle normative di tipo ecologico e del mercato:

- inasprimento dei limiti di emissioni nocive (Euro 6d a partire dal 2018, ed la prossima potenziale introduzione dell'Euro 7), di gas serra Normativa EU2020 e successive evoluzioni (fino a 95 g/km nel 2020 e 75 g/km nel 2025) e alle limitazioni imposte da alcune amministrazioni comunali agli attuali diesel;

- introduzione di mezzi ad emissioni quasi zero in particolare per scenari urbani;
- aumento delle prestazioni (non solo in termini di potenza massima, ma soprattutto di coppia ai bassi e medi regimi) e della guidabilità dei veicoli (fun-to-drive).

La sempre maggior diffusione prevista di veicoli con propulsione ibrida e/o elettrica rappresenta un'ulteriore sfida nella gestione della diverse sorgenti di energia a bordo veicolo (energia chimica del combustibile trasformata dal motore termico ed energia elettrica accumulata nelle batterie), a cui si aggiunge la necessità di controllare le temperature dei diversi sotto-sistemi del veicolo (motore termico, sistema elettrico, sistema di accumulo, ...), la gestione di ausiliari elettrici piuttosto che il recupero ed il riutilizzo dell'energia (harvesting).
Assume quindi sempre maggior rilievo che gli sviluppi tecnici e tecnologici dei nuovi sistemi e componenti sia parte integrante di un nuovo approccio sistemico integrato rivolto all'ottimizzazione della gestione energetica del veicolo.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Le tecnologie per ridurre ulteriormente i consumi e le emissioni dei veicoli sono in fase di sviluppo presso quasi tutti i costruttori autoveicolistici.
La tecnologia italiana ha una posizione di primo piano in questo scenario ed in tutti i settori (automobili, macchine agricole e da costruzione, bus e veicoli commerciali ed industriali) che deve essere mantenuta al fine di garantire la competitività dei costruttori e dei componentisti nazionali.
Tuttavia, al momento, buona parte delle tecnologie che consentirebbero un ulteriore miglioramento dell'efficienza energetica dei veicoli non sono ancora sviluppate a livello industriale ed è necessaria un'azione che permette di garantire tale sviluppo.
Lo sviluppo e l'introduzione sul mercato, in anticipo, delle differenti tecnologie considerate, consentirà all'industria italiana del settore di consolidare la posizione attuale e, se effettuati in tempo brevi, probabilmente di migliorala permettendo un posizionamento sul mercato da leader competitivo.
L'industria nazionale ha già dimostrato di possedere tutte le capacità di ricerca, sviluppo e industrializzazione per raggiungere tale obiettivo.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

70 milioni di euro

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 8

CYBER FLEET: LA SOLUZIONE IOT PIRELLI PER IL BUSINESS DELLE FLOTTE

Pirelli è alla costante ricerca di innovazione, sempre attenta ai bisogni dei clienti al fine di creare tecnologie ad hoc in grado di massimizzare sicurezza, performance, efficacia ed efficienza dei veicoli. L'impegno e la passione in ricerca e sviluppo, coinvolgendo più di 1800 persone e numerose collaborazioni con università e centri di ricerca, hanno dato vita nel 2005 all'ampio progetto delle Cyber Technologies, che sta cambiando e cambierà il modo di vivere la strada, consentendo agli utenti di restare sempre connessi e consapevoli delle condizioni dei propri pneumatici. Il progetto nasce dalla consapevolezza che, ad oggi, i veicoli forniscono al consumatore informazioni dettagliate provenienti da tutte le sue componenti, eccetto che dai pneumatici. In realtà questi ultimi rappresentano l'unico elemento di contatto con la strada e la possibilità di intervenire in modo proattivo e preventivo consentirebbe di gestire al meglio l'efficienza del veicolo stesso.

Le Cyber Technolgies trasformano il pneumatico in un prodotto digitale ed innovativo, che contribuisce a rendere più efficiente il mondo del trasporto pubblico e privato, sia esso relativo alle auto o ai veicoli industriali. I pneumatici diventano "intelligenti" in quanto dotati di sensori di ultima generazione con tecnologia Bluetooth Low Energy, che vengono installati sul rivestimento interno dei pneumatici e che consentono una connessione costante tra il veicolo, driver e/o gestore della flotta e il gommista. Dal contatto del pneumatico con la strada si generano dati importantissimi che, inviati al cloud Pirelli, vengono elaborati da sofisticati algoritmi e successivamente trasformati in informazioni utili per il consumatore e/o il gestore della flotta, fornendo stime e predizioni sul consumo carburante, efficienza dei veicoli ed operazioni di manutenzione. Tali dati vengono conservati nel Pirelli Virtual Private cloud che è costruito su una piattaforma IOT e che garantisce massima affidabilità e sicurezza nella gestione dei dati.

Le informazioni così ricevute sullo stato dei pneumatici, miglioranola sicurezza su strada, l'efficienza e il controllo tanto sui pneumatici quanto sulle prestazioni del veicolo. . Inoltre, tempi e costi di gestione del mezzo vengono notevolmente ridotti, grazie alla manutenzione preventiva che consente una riduzione del fermo veicolo e dei possibili guasti.

La "sensorizzazione" delle gomme è parte integrante della strategia "Perfect Fit" di Pirelli, che si focalizza sullo sviluppo di prodotti e servizi "tailor made" per le esigenze delle flotte, delle Case auto e, in generale, degli automobilisti.

In questo contesto altamente tecnologico, Pirelli si propone al mercato con le prime due soluzioni Cyber per le flotte di veicoli commerciali: Cyber Fleet Smart e Cyber Fleet Gate pensate per ottimizzare i costi di gestione, aumentare la sicurezza e l'efficienza dei trasporti, ridurre il fermo veicoli e le emissioni di $CO_{2.}$ Entrambe le soluzioni sono destinate ad ogni tipo di flotta: bus per il trasporto persone, flotte di veicoli per il trasporto urbano e regionale e compagnie di leasing.

Identificativo del pneumatico, pressione misurata e compensata (oltre alle pressioni target e no-

minale), temperatura interna, efficienza del veicolo: sono queste le informazioni che vengono raccolte dai pneumatici e trasferite in tempo reale al gestore della flotta e all'autista stesso.
La soluzione Smart è una soluzione *Plug&Play* che prevede una comunicazione diretta tra i sensori installati nei pneumatici e un'applicazione, Smart App, tramite la quale l'utente ha la possibilità di monitorare le condizioni dei suoi pneumatici ogni qualvolta ne abbia necessità. In meno di 30 secondi, il sitema è in grado di rilevare le condizioni di tutti i pneumatici e, in caso di pressione bassa o lento sgonfiamento, mostra un allarme per segnalare l'anomalia ed offre un manometro digitale che consente di raggiungere il livello di pressione ottimale.
La soluzione Gate incrementa ulteriormente l'efficienza dei veicoli prevedendo l'installazione di un semaforo nel deposito della flotta che, posizionato in ingresso o uscita dei veicoli, fornisce un'indicazione rapida e puntuale circa le condizioni dei pneumatici ed avvisa il conducente, in caso di luce rossa, circa la necessità di una manutenzione immediata. Allo stesso tempo, il gestore della flotta ha la possibilità di monitorare da remoto la situazione di tutti i suoi veicoli, grazie al portale web Cyber Fleet Control e di agire tempestivamente e proattivamente al fine di garantire la massima efficienza dei suoi mezzi di trasporto.
I veicoli potranno così iniziare ogni giornata in condizioni ottimali.
Periodicamente, inoltre, il Fleet Manager riceverà un report di utilizzo degli pneumatici della flotta, con indicazioni precise sull'efficienza del veicolo.

MOTIVAZIONE PER LO SVILUPPO

Nello sviluppo della tecnologia Cyber Fleet, Pirelli è partita dall'analisi dei "pain points" che affliggono i professionisti del mondo del trasporto. Una corretta manutenzione dei pneumatici è infatti fondamentale per ridurre il consumo di carburante, la possibilità di guasti ed aumentare la vita dei pneumatici stessi. È stato calcolato che, su una percorrenza di 100.000 km è possibile avere un risparmio annuo di oltre il 4% di gasolio, pari ad oltre 900 litri. Oltre ad un impatto ambientale più basso grazie alla riduzione delle emissioni, il vantaggio sta anche nella vita media dei pneumatici, che aumenta di circa il 10%. Tuttavia, il monitoraggio dei pneumatici è un'operazione time consuming, che richiede il fermo del veicolo che difficilmente viene effettuata con costanza e la giusta frequenza.
La trasformazione del pneumatico in un prodotto digitale, ha permesso il superamento di questi ostacoli, fornendo ai professionisti del trasporto una soluzione innovativa per aumentare la sicurezza e l'efficienza del proprio business.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

I pneumatici "intelligenti" sono una realtà relativamente recente, ma in rapido sviluppo e che richiede un'attività di ricerca costante al fine di proporre tecnologie sempre più sofisticate e adeguate alle esigenze di mercato. Questa trasformazione del concetto di pneumatico influenza e continuerà ad influenzare in maniera sempre maggiore le aspettative dei clienti, che sono alla ricerca di condizioni di guida sicure, comode e che consentano di ridurre costi e tempi di gestione e manutenzione. Il settore sta affrontando questa trasformazione digitale sempre più orientata all'autonomous driving. Aspetti quali l'impatto ambientale, risparmio in termini di tempo e dena-

ro per la manutenzione, efficienza dei veicoli, sono temi che non possono essere trascurati e sui quali Pirelli sta concentrando le sue energie.
Pirelli non è la sola ad aver intrapreso la strada della digitalizzazione. Le nuove opportunità tecnologiche emerse nel mercato hanno generato un trend irreversibile che vede i principali players del mercato modificare o trasformare il proprio modello di business per avvicinarsi al mondo dei servizi con la proposizione di **soluzioni innovative** legate al mondo della mobilità.
La tecnologia legata ai **sensori** (a tecnologia BLE o a radiofrequenza) è alla base di queste soluzioni, e permette di conoscere in tempo reale lo status degli pneumatici e segnalare valori discostanti da quelli target tramite un opportuno sistema di notifiche.

TECNOLOGIE PRIORITARIE - TRASPORTO FERROVIARIO

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 9
METODOLOGIE E TECNOLOGIE INNOVATIVE PER LA DIAGNOSTICA PREDITTIVA DEL SISTEMA FERROVIARIO E METROPOLITANO A GUIDA AUTONOMA TRAMITE VEICOLI COMMERCIALI

Per poter rendere competitivo e sostenibile il trasporto su ferro secondo quanto atteso a livello europeo è necessario sviluppare strategie di monitoraggio, diagnostica e manutenzione 'event-driven' del sistema veicolo-infrastruttura. Tali strategie non solo si basano sull'adozione di innovative tecniche di rielaborazione dati e modellazione del sistema, ma dovranno essere associate a sistemi di misura caratterizzati da versatilità, facilità di implementazione, basso consumo ed alta efficienza. È fondamentale per lo sviluppo e miglioramento del sistema ferroviario definire logiche e sistemi di diagnostica facilmente implementabili nella struttura di bordo di veicoli commerciali, esistenti od in fase di sviluppo, così da consentire l'osservazione sul lungo periodo dell'infrastruttura, senza incidere sulla sicurezza dell'esercizio.

Una caratteristica fondamentale della tecnologia diagnostica è il funzionamento predittivo che comporta quindi una notevole semplificazione di un sistema altamente complesso quale l'interazione veicolo-armamento.

Obiettivo finale è di disporre di una flotta diagnostica che quindi sostituisca il concetto di veicolo diagnostico che arrivi ad un sistema integrato di autodiagnostica.

Per garantire l'efficacia del sistema diagnostico è necessario:

- individuare tecnologie innovative per la raccolta, gestione ed elaborazione dei dati ferroviari (raccolti da sistemi di bordo e di terra eterogenei), a sostegno di nuovi approcci di manutenzione intelligente, che non richieda di sviluppare nuovi database o nuovi asset register;
- individuare tecnologie innovative per o sviluppo di un sistema a supporto alle decisioni integrato e interoperabile basato su strategie di manutenzione di tipo predittivo in grado di valutare il livello di rischio associato a ciascun asset e di gestire la pianificazione e distribuzione delle risorse (personale, attrezzature etc.)

I principali benefici attesi da questa tecnologia prioritaria sono:

- prolungamento della vita dei componenti dell'infrastruttura e conseguente riduzione nell'uso di componenti e materiali ad alta intensità energetica;
- riduzione dei costi del ciclo totale di vita dell'infrastruttura, con minimizzazione delle già contenute interruzioni del servizio e con potenziamento degli standard prestazionali in termini di comfort dei passeggeri e ridotta emissione vibro-acustica.

A completamento di questa tecnologia vi è l'intento di operare un trasferimento tecnologico che, sfruttando gli sviluppi in campo ferroviario, permetta di definire una metodologia diagnostica predittiva sia per la linea che per il veicolo in caso di soluzioni driveless, ad esempio applicate in campo di trasporto metropolitano.
Anche in questo caso l'obiettivo ultimo è quello di superare il concetto di veicolo diagnostico, ma di implementare una flotta diagnostica che sia in grado di permettere la definizione di una piattaforma per la gestione intelligente ed integrata dei dati acquisiti durante la marcia in servizio dei treni e l'ottimizzazione del ciclo manutentivo.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

L'incremento della velocità commerciale ha portato ad un crescente interesse, da parte delle amministrazioni ferroviarie e degli operatori del settore, alla qualità delle infrastrutture, linea aerea e binario. In particolare la definizione di una diagnostica dell'infrastruttura in grado di monitorare correttamente in termini di efficienza, sicurezza ed affidabilità la rete ferroviaria, impiegando tecniche e strumentazione sempre più avanzate, ma che abbiano costi contenuti, è diventata prioritaria.
Una corretta identificazione dell'irregolarità della linea e della catenaria permette di poter integrare una manutenzione ciclica con una manutenzione on condition", ovvero poter operare, con interventi mirati, dove la rilevazione ha identificato la necessità di una manutenzione.
In questo modo è possibile avere una previsione in termini di tempo sul verificarsi di un possibile problema, incrementando notevolmente l'affidabilità e la sicurezza della linea stessa.
Per quanto concerne invece l'applicazione delle soluzioni a guida autonoma o driveless, negli ultimi anni si è assistito ad un incremento del loro impiego in campo metropolitano. L'utilizzo di questi sistemi di trasporto solleva differenti problematiche inerenti alla manutenzione della linea e del veicolo.
La presenza del macchinista, infatti, assicura l'identificazione anche preventiva di eventuali malfunzionamenti del veicolo/infrastruttura, ad esempio dovuti al degradare dei componenti e/o della linea.
L'assenza di quest'ultimo richiede per garantire l'affidabilità ed efficienza del servizio, l'introduzione di un sistema diagnostico di veicolo/infrastruttura che sia poco invasivo e facilmente integrabile nel sistema di controllo del veicolo.
Si aggiunga che nell'ottica della possibilità di un servizio continuo del trasporto pubblico l'impiego di soluzioni senza guidatore rappresenta una sfida percorribile, tanto più che lo sviluppo della tecnologia permette di individuare soluzioni economiche. Accompagnare questo sviluppo/sfida con la definizione di una metodologia di diagnostica veicolo/infrastruttura permette di garantire un servizio continuo, affidabile e sicuro, programmando la manutenzione in modo tale da non interferire con il servizio offerto

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Esistono diverse soluzioni per rilevare la geometria del binario e/o della linea aerea, in particolare negli ultimi anni sono stati favoriti quei sistemi e metodi di misura rapidi ed efficaci installati su di

un treno che possa percorrere il tracciato di cui si vuole monitorare la condizione a una velocità paragonabile ai mezzi commerciali che viaggiano sulla linea stessa. Gli enti ferroviari mondiali, per quanto riguarda questo aspetto, hanno adottato treni diagnostici con elevata velocità di percorrenza e altrettanta rapidità di acquisizione dei dati.
L'analisi dello stato della linea avviene con corse dedicate dei treni diagnostici e la valutazione dei dati non è predittiva.
Lo sviluppo di una diagnostica predittiva basata sull'impiego della flotta commerciale rappresenta un ulteriore sviluppo di un sistema di monitoraggio e controllo che sta diventando sempre più importante in campo ferroviario.
È indubbio il vantaggio dell'impiego della flotta commerciale come treni diagnostici perché permettono un controllo/verifica continua dello stato della linea nonché una facilitazione nella pianificazione/esecuzione degli interventi.
Il sistema metropolitano driveless rappresenta il futuro della mass-transit, da decenni i produttori stanno lavorando a questi sistemi che hanno visto numerose applicazioni che garantiscono con il massimo dell'efficienza la marcia dei treni e la loro sicurezza in tutti gli aspetti: ad esempio il "distanziamento" fra un convoglio e l'altro per evitare collisioni. È un sistema già in funzione nelle metropolitane di Copenaghen, Singapore, Vancouver, Docklands (Londra), Hong Kong, Lille, Parigi e Torino Milano oltre che in molti aeroporti.
Tuttavia un aspetto spesso non considerato appieno è come l'assenza del driver possa incidere sulla manutenzione delle linee che vengono ad oggi eseguite per lo più senza un vero e proprio sistema a supporto alle decisioni integrato e interoperabile basato su strategie di manutenzione di tipo predittivo in grado di valutare il livello di rischio associato a ciascun asset e di gestire la pianificazione e distribuzione delle risorse (personale, attrezzature ertc..).

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

15 milioni di euro

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 10

TECNOLOGIE E MATERIALI INNOVATIVI PER L'INCREMENTO DELLA CAPACITÀ IN AMBITO FERROVIARIO

Il raggiungimento degli obiettivi europei non può prescindere dal rinnovamento/ottimizzazione dei treni Alta Capacità. Infatti, la volontà di incrementare il numero di passeggeri trasportati con questo mezzo di trasporto è evidente tra gli obiettivi dei prossimi decenni.
Come diretta conseguenza vi è quindi la necessità di un rinnovo sostanziale degli esistenti treni che effettuano servizio su line ad Alta Capacità, nonché di un'innovazione delle soluzioni costruttive impiegate per la realizzazione dei veicoli di nuova concezione.
Si richiede quindi l'applicazione/studio di soluzioni innovative che favoriscano una riduzione di peso del veicolo per compensare l'incremento di peso derivante dai crescenti contenuti.
Lo sviluppo di sistemi di trazione o ausiliari innovativi (e.g. motori, inverter, condizionatori) che abbinino un peso contenuto all'efficienza richiesta permetterà l'alleggerimento della struttura del veicolo e la possibilità di impiegare nella fase costruttiva nuovi materiali metallici e non metallici allo scopo di ottimizzare le performance del prodotto target, contribuendo alla riduzione dei consumi del veicolo, riduzione dei costi di manutenzione ed a un minor utilizzo di risorse per la costruzione.
Si crea di fatto un ciclo virtuoso: la riduzione del peso, per effetto dell'impiego di materiali innovativi facilita l'incremento della capacità trasportata, ma favorisce anche la riduzione della potenza assorbita e dei consumi, agevolando l'utilizzo di ausiliari e sistemi di trazione di minor potenza e minor peso.
Il trasferimento tecnologico dalle nuove soluzioni a quelle esistenti attraverso il revamping garantirà l'uniformarsi della flotta e significativi benefici in termini di manutenzione e sostenibilità del trasporto su ferro.
Le principali problematiche tecnico-scientifiche e tecnologiche da risolvere per conseguire gli obiettivi dichiarati riguardano il miglioramento delle proprietà strutturali e funzionali dei materiali.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Le direttive europee in ambito trasportistico sono volte alla decarbonizzazione del trasporto di merci e passeggeri. Una risposta a questa esigenza è l'incremento di merci e passeggeri trasportate su rete ferroviaria. L'aumento del numero di passeggeri trasportati è possibile purché si connubi ad un aumento del servizio una ottimizzazione dei veicoli ferroviari. Per garantire standard di sicurezza elevati è infatti necessario compensare un eventuale aumento di carico attraverso l'alleggerimento del veicolo.
È evidente che i benefici che si possono trarre da un'innovazione in componenti e materiali per la realizzazione o revamping dei treni ad alta capacità sono molteplici:

- Incremento delle merci/persone trasportate;
- Riduzione dei costi di manutenzione;
- Riduzione dei costi di produzione;
- Incremento della sostenibilità;
- Riduzione della Potenza assorbita dal rotabile.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Per quanto riguarda l'impiego dei materiali nel settore ferroviario lo scenario attuale presenta un largo uso di componenti metallici (prevalentemente acciaio e leghe di alluminio) a livello strutturale per cassa e carrello del veicolo. Gli impieghi di materiali a base resina (vetroresina e similari) sono maggiori per applicazioni nel settore urbano e mass transit per la realizzazione delle cabine di guida dei veicoli (tram e metropolitane).

Per le parti non strutturali della cassa si assiste negli ultimi anni all'impiego di materiali non metallici, appartenenti alla famiglia dei compositi termoplastici e termoindurenti.

È chiaro che per l'interiors (allestimenti e mantovane) si preferisce l'impiego di materiali non metallici per via della loro leggerezza, resistenza e costo ridotto di produzione.

Molti passi sono stati compiuti negli ultimi anni dove si è assistito al proliferare di componenti a matrice polimerica progettati appunto per rispettare le condizioni estreme di esposizione al fuoco e alla fiamma. In alcuni casi sono stati realizzate casse tramviarie completamente in composito sulla base dei risultati avanzati derivanti dal settore automotive ed in parte aerospaziale.

L'insieme dell'impiego oculato dei materiali compositi e di leghe in alluminio potrà conferire ai veicoli una riduzione del peso a tara e dei cimenti meccanici nel contatto ruota rotaia per migliorare la durata delle parti a contatto, il rumore e vibrazioni generate ed il confort per il passeggero.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

10 milioni di euro

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 11

TECNOLOGIE PER LA TRACCIABILITÀ E DIAGNOSTICA DEI CARRI MERCI

Lo sviluppo di un sistema di tracciabilità e diagnostica di carri merci e l'incremento della sicurezza del trasporto delle merci su ferro si ottiene attraverso l'impiego di tecnologie all'avanguardia come sistemi di tipo harvesting, che permettono l'implementazione di sistemi intelligenti su veicoli come i carri merci dove, a causa della loro morfologia, è indiscussa la difficoltà a realizzare un cablaggio per trasmissione segnale e/o alimentazione.
Sfruttando questa tecnologia è quindi possibile progettare soluzioni in grado di monitorare parametri importanti per la sicurezza di marcia e del servizio come la temperatura delle boccole, la presenza di assi bloccati, la perdita di merci pericolose (e.g. attraverso opportuni sniffer).
Inoltre è possibile fornire nuove soluzioni di sistema basate su metodi completamente nuovi per l'instradamento dei treni al fine di migliorare radicalmente la capacità e le prestazioni delle linee e ridurre i costi pur mantenendo inalterato il livello di sicurezza. L'impiego inoltre di tecnologie innovative di localizzazione permetterebbe di definire un sistema di posizionamento assoluto e interoperabile in grado di ridurre in modo significativo il numero degli attuali sistemi di localizzazione dei treni tradizionali, basato su tecnologie satellitari.
Accanto a questi sistemi intelligenti è altresì necessario sviluppare una rete di terra in grado di memorizzare i dati acquisiti a bordo veicolo, rielaborarli per una manutenzione preventiva del sistema veicolo-infrastruttura.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Uno degli evidenti obiettivi europei è lo sviluppo di reti intermodali per il trasporto delle merci, dove il settore ferroviario rappresenta l'attore principale, basti pensare i numerosi corridoi merci che si intende concludere entro il 2050.
Lo sviluppo di una rete intermodale di trasporto merci può quindi essere, possibile, efficiente ed efficace, se e solo se il trasporto merci ferroviario adotta soluzioni di alto livello innovativo.
In particolare, non solo la tracciabilità diventa un aspetto imprescindibile per questo sistema, favorendo l'ottimizzazione della gestione del sistema, ma garantisce anche un incremento della sicurezza, dell'affidabilità e della puntualità permettendo di sviluppare sulle reti ferroviarie un sistema di diagnostica completo.
Un'efficiente ed adeguata diagnostica del rotabile merci permette di garantire ottimi livelli di sicurezza e regolarità del servizio di trasporto su ferro, ne migliora l'efficienza e la manutenzione, portando anche a notevoli vantaggi economici.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

In questi ultimi anni in campo europeo è stato dato largo spazio all'innovazione in campo ferro-

viario delle merci, purtroppo in Italia ad oggi il trasporto merci via ferro rimane una modalità di trasporto poco significativa. Tuttavia negli ultimi anni si è riscontrato un incremento dell'interesse al miglioramento del servizio ed allo sviluppo di un approccio diagnostico.
Dall'altro canto i sistemi harvesting, essendo divenuti economicamente più accessibili iniziano ad essere commercializzati in differenti settori.
Esiste un grande sviluppo di siti di accessibilità, le tecnologie dei big data permettono la gestione di grandi volumi di dati rendendo possibili applicazioni significative nella connettività dei veicoli e la loro tracciabilità.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

20 milioni di euro

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 12

TECNOLOGIE PER LO SVILUPPO DI VEICOLI FERROVIARI AD ALTA EFFICIENZA ENERGETICA

L'impiego di tecnologie innovative in ambito della progettazione del veicolo o del suo revamping permetterà il miglioramento e l'ottimizzazione dell'efficienza energetica del sistema su ferro, instaurando un ciclo virtuoso che partendo dalla necessità di alleggerire il veicolo per ridurne i consumi vede l'impiego di componentistica di potenza e/o convertitori ed ausiliari all'avanguardia (e.g. convertitori ad alta frequenza), che facilitano l'alleggerimento della struttura del veicolo favorendo quindi la riduzione della potenza necessaria per la trazione con conseguente adozione di nuovi motori a magneti permanenti più compatti e leggeri.
L'ottenimento di un veicolo più leggero per effetto del ciclo virtuoso di cui sopra riduce l'aggressività del veicolo nei confronti dell'infrastruttura moderando la frequenza degli interventi manutentivi ed incrementando quindi l'efficienza del sistema ferroviario.
Infine a completamento di quanto sopra, si impiegheranno e svilupperanno nuove tecnologie/soluzioni meccaniche e/o impiantistiche che integrate nel progetto del veicolo e nell'infrastruttura esistente con rinnovamento ad esempio delle sottostazioni, favoriranno il recupero energetico durante il servizio del veicolo.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Il trasporto su ferro diventerà sempre più importante nella mobilità door-to-door italiana ed europea.
È chiaro che in questo contesto lo sviluppo di trasporto su ferro ad alta efficienza energetica ed altamente eco-sostenibile ha un ruolo sempre più importante.
Per raggiungere questo obiettivo è necessario pensare ad un veicolo che sfrutti l'impiego di componentistica di potenza innovativa e soluzioni all'avanguardia per il risparmio energetico che coinvolgano non solo il veicolo, ma l'intera rete.
Un veicolo più leggero implica una riduzione dei costi di esercizio, assorbendo questo minore potenza si ha la possibilità di scegliere azionamenti più leggeri instaurando un ciclo virtuoso.
Un'infrastruttura all'avanguardia invece permetterebbe il recupero energetico, sfruttando la peculiarità del servizio ferroviario, che vede molte linee regionali ed urbane caratterizzate da frequenti frenature.
Quanto sopra assume un'importanza rilevante per quanto concerne il trasporto merci e la sua coesistenza su linee per il trasporto passeggeri.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Dal punto di vista dell'elettronica di potenza, negli ultimi anni, sono state fornite numerose solu-

zioni altamente efficienti ed a costo contenuto, che se applicate in ambito ferroviario potrebbero favorire la progettazione di strutture più leggere e quindi l'impiego di materiali innovativi che permetterebbero l'alleggerimento del veicolo, con la possibilità di ridurre la potenza richiesta durante il servizio e l'impiego di motori a magneti permanenti.
Da tempo inoltre in molti ambiti sono stati sviluppati diversi studi per il recupero di energia dalla frenatura in servizio del convoglio ferroviario. Soluzioni sia di tipo meccanico che di tipo elettrico possono essere sfruttate per raggiungere questo obiettivo dal lato veicolo, mentre dal lato infrastruttura è necessario definire delle metodologie di rinnovo per favorire l'ottimizzazione del recupero energetico.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

15 milioni di euro

TECNOLOGIE PRIORITARIE - TRASPORTO NAVALE

I temi strategici a medio lungo termine sono di fatto in perfetta sincronia con gli obiettivi stabiliti nel quadro europeo e concernono aspetti cruciali come la sostenibilità ambientale, l'efficienza energetica, la digitalizzazione a bordo, l'automazione, il processo produttivo e la competitività del settore a livello globale.
Per il comparto marittimo in particolare, si propongono le seguenti tematiche strategiche.

Sostenibilità ambientale ed efficienza energetica

La sostenibilità ambientale e l'efficienza energetica del settore marittimo costituiscono alcune delle tendenze di innovazione tra le più diffuse e rilevanti degli ultimi decenni. È quindi necessario procedere attraverso un approccio olistico in grado di integrare l'operato dei costruttori dei mezzi di trasporto, dei fornitori dei sistemi di alimentazione a bordo e dei gestori delle infrastrutture, agendo sulla riduzione degli inquinanti emessi in aria e in acqua nonché sulla corretta gestione di altre fonti d'inquinament

o. Rileva a tal fine il sostegno fondamentale al passaggio verso fonti di energia più sostenibili e verso innovative tecnologie di generazione e distribuzione elettrica. L'intera filiera energetica necessita quindi di approfondite ricerche, a partire dall'uso di nuovi combustibili a basso impatto, dalla generazione e trasformazione fino all'immagazzinamento (*energy storage*) dell'energia. In aggiunta, al fine di garantire la continua ottimizzazione delle prestazioni complessive della nave a parità di potenza assorbita, l'introduzione di materiali a basso impatto ambientale, la promozione di nuove concezioni per l'eco-design e l'installazione di sistemi di supporto decisionale in esercizio sono ugualmente di primaria importanza.

Digitalizzazione, comunicazione e connettività a bordo

La rivoluzione digitale ha fortemente influenzato tutti i settori economici, avviando una trasformazione senza precedenti. Il diffuso processo di digitalizzazione in atto anche nei riguardi del comparto marittimo renderà possibile non solo un elevato sviluppo della sensorizzazione della nave e della connettività a bordo (con nuove reti di bordo che permettano di supportare la disponibilità di dati e l'offerta di servizi e in ogni area della nave), ma anche una stretta interconnessione tra mezzi navali (*ship-to-ship*), così come tra mezzi e infrastrutture a terra (*ship-to-shore*). Questo permetterà il pieno dispiegarsi di tecnologie basate sui big data. La progettazione navale dovrà quindi considerare il continuo aggiornamento dei mezzi con le più avanzate tecnologie lungo il loro intero ciclo di esistenza, non solo in termini di rilevamento, monitoraggio o supporto alla navigazione, ma anche con riguardo a soluzioni per incrementare il valore aggiunto del carico utile. La digitalizzazione permetterà dunque il miglioramento generale dell'efficienza e della

flessibilità del settore attraverso la profonda evoluzione delle attività economiche ad esso legate secondo dinamiche di rapida automazione e integrazione dei sistemi, dei mezzi e delle infrastrutture, in un quadro di crescente sicurezza, anche a livello digitale (*cybersecurity*)

Completa automazione della nave

Lo sviluppo della nave autonoma costituisce attualmente una delle maggiori sfide per il settore navale, soprattutto in riferimento alle imbarcazioni di dimensioni rilevanti in aree di manovra particolarmente trafficate. Elemento essenziale per l'evoluzione della tematica è rappresentato dall'identificazione di nuove tecnologie che, promuovendo l'integrazione tra sistemi differenti, siano in grado di definire in ogni istante lo stato della nave rispetto all'ambiente esterno, tracciarne le attività e abilitarne la manovra in condizioni di sicurezza. Simili tecnologie dovrebbero essere capaci di analizzare in tempo reale segnali provenienti dai numerosi sensori, elaborando rapidamente uno scenario di movimento della nave in assenza di controllo umano. In tal senso ulteriori ricerche approfondite saranno necessarie con riferimento alla *cybersecurity* allo scopo di evitare qualsiasi possibile interferenza.

Nuovi mezzi marini

Il comparto navale presenta sempre più frequentemente la necessità di mezzi nuovi e tecnologicamente avanzati per abilitare l'estrazione delle risorse offerte dall'ambiente marino. Le nuove frontiere di sviluppo lasciano emergere sfide tecnologiche significative con riferimento alla realizzazione di mezzi in grado di essere impiegati in ambienti particolari (regioni artiche, regioni con condizioni di mare estreme, etc.) o svolgere operazioni complesse in mare aperto (*deep-sea mining*, etc.).

Processo produttivo

Allo stato attuale, gli obiettivi di medio-lungo periodo, con riferimento al miglioramento delle fasi di design e produzione navale, sono orientati allo sviluppo della sicurezza, dell'automazione e della produttività. L'evoluzione di nuovi modelli computazionali, metodologie di produzione additiva (quali *3D printing*), dispositivi cobotici, logistica e procedure di controllo qualità costituiranno elementi in grado di assicurare la transizione dei siti di produzione verso l'*Industria 4.0.* In tal senso, nei prossimi anni, il processo produttivo assumerà un approccio portato a considerare l'intero ciclo di esistenza della nave, dal design fino alla dismissione, con una particolare attenzione per metodologie di fabbricazione innovative, efficienti ed economicamente vantaggiose, in ottica di ridurre i costi a vita intera e limitare l'impatto ambientale in fase di smaltimento (*ship recycling*). Inoltre, l'introduzione di nuovi materiali e/o l'integrazione di materiali già esistenti, come i materiali compositi, sarà abilitante per raggiungere obiettivi diversi, tra i quali la riduzione peso.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 13

SOLUZIONI E TECNOLOGIE INNOVATIVE PER GARANTIRE UNA MAGGIORE SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE E UNA MIGLIORE EFFICIENZA ENERGETICA A BORDO

La sostenibilità del trasporto marittimo e la necessità di una sua maggiore efficienza energetica rappresentano obiettivi fondamentali per il settore, inseriti nel quadro delle più grandi sfide globali. Le priorità tecniche di medio-lungo periodo in tale ambito si concentrano su:

- contenimento delle emissioni inquinanti a bordo, in aria e acqua;
- gestione dei rifiuti;
- generazione, trasformazione, immagazzinamento dell'energia a bordo;
- ottimizzazione dei consumi energetici.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

La riduzione e il trattamento delle emissioni in aria e degli scarichi in acqua costituiscono quindi un'importante traguardo tecnologico, che è possibile raggiungere mediante l'introduzione nel lungo termine di tecnologie innovative che agiscano:

- sugli inquinanti prodotti durante la combustione (es. scrubber per la riduzione di SO_x, filtri catalici, CCS, filtri particolati, etc.);
- sul trattamento delle acque reflue (grigie e nere), delle acque oleose di sentina e dell'acqua di zavorra.

Al fine contenere le emissioni, sistemi e soluzioni per svincolare le future navi dai combustibili fossili e configurazioni impiantistiche innovative abilitate da fonti sostenibili (es. idrogeno, LNG, biocombustibili) e rinnovabili sono in continua analisi e valutazione. Una menzione specifica deve poi essere riservata anche alla riduzione delle emissioni di rumore, come vibrazioni a bordo ed emissioni sonore in acqua o in aria, prodotte dai macchinari di bordo e dai sistemi di propulsione, con l'introduzione di materiali isolanti innovativi da sostituirsi alla comune lana di roccia. Una tematica da approfondire ulteriormente è anche lo smaltimento dei rifiuti di bordo. In particolare sulle grandi navi passeggeri sarà necessario implementare l'efficienza di sorting all'origine, differenziazione, smaltimento e incenerimento dei rifiuti, controllando e limitando le emissioni nocive e lo sviluppo d'infezioni batteriche.

Con riguardo invece all'efficienza energetica, i temi principali allo studio per garantire l'eccellenza in campo internazionale concernono miglioramenti del bilancio energetico in materia di:

- impianti di produzione e accumulo dell'energia elettrica (es. fuel cell, motori dual fuel, etc.);
- analisi e ottimizzazione dei consumi energetici di bordo;
- recuperi energetici, anche tramite la corretta gestione delle sorgenti di calore ad alta ed a bassa temperatura.

A tal fine risultano essenziali le ricerche effettuate in ambito di:

- sistemi di propulsione e di generazione;
- eco-design (es. idrodinamica di carena);
- riduzione della resistenza idrodinamica;
- scienza dei materiali;
- sistemi di immagazzinamento (es. batterie, etc.);
- distribuzione (es. superconduttori, smart e DC grid, etc.) ed utilizzo dell'energia termica ed elettrica a bordo;
- sistemi di automazione e controllo.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Allo stato attuale, esistono numerose soluzioni, in particolare per il contenimento dei singoli inquinanti in aria (scrubber, SCR, filtri catalitici, filtri ceramici, etc.), ma mancano strutture integrate e compatte agevolmente applicabili a bordo di navi, sebbene recentemente nuovi sistemi di abbattimento, di tipo ibrido, in grado di funzionare sia con acqua di mare sia in ciclo chiuso, siano stati installati su numerosi mezzi. La questione controllo delle emissioni in aria è stata sostanzialmente affrontata attraverso lo sviluppo di sistemi di generazione risultanti dallo studio di nuove architetture di generazione e distribuzione dell'energia elettrica. Anche per il trattamento delle acque e dei rifiuti le soluzioni possibili sono molteplici, ma è necessario integrare ed ottimizzare i sistemi migliori rendendoli facilmente installabili a bordo e possibilmente limitandone l'assorbimento energetico gli spazi necessari per la sistemazione.

Con riferimento invece all'ottimizzazione dei consumi energetici, miglioramenti del bilancio energetico sono oggetto di ricerca per quanto concerne l'incremento del rendimento energetico globale delle navi, gli impianti di produzione e accumulo dell'energia elettrica, l'analisi e l'ottimizzazione dei consumi energetici di bordo e i recuperi energetici. Sul mercato esistono soluzioni specifiche per alcune delle problematiche della materia, elaborate tuttavia in contesti diversi da quello navale e per applicazioni di dimensione non paragonabile. Recentemente sono state sviluppate soluzioni fluidodinamiche innovative per quanto concerne eliche, carene e sovrastrutture sia in mare calmo che in caso di presenza di moto ondoso, con inoltre la valutazione di diversi materiali per ridurre il peso della nave e migliorarne l'efficienza complessiva. Attualmente, intense ricerche coinvolgono soluzioni per il recupero energetico e la riduzione dell'impatto ambientale attraverso sistemi di produzione di energia elettrica tramite calore di scarto. L'applicazione a bordo delle navi di motori dual fuel in grado di utilizzare combustibili tradizionali e gas naturale liquefatto rappresenta poi una delle più promettenti innovazioni nel breve periodo. Considerando invece un'ottica di più lungo periodo, l'introduzione a bordo di combustibili alternativi e non fossili che permetterebbe quindi una decisa accelerazione sul percorso di decarbonizzazione del trasporto marittimo, si scontra con uno sviluppo tecnologico ancora immaturo anche per i sistemi di immagazzinamento e distribuzione a bordo, e sulla mancanza di un quadro normativo di riferimento. A tal riguardo quindi le attività di ricerca e innovazione risultano particolarmente strategiche nella misura in cui, per tali tecnologie maggiormente innovative, permettono di contribuire allo sviluppo delle conoscenze tecnologiche che rappresentano il prerequisito per uno sviluppo normativo coerente e strutturato.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 14

SOLUZIONI E TECNOLOGIE INNOVATIVE PER LA DIGITALIZZAZIONE, LA COMUNICAZIONE E LA CONNETTIVITÀ A BORDO

Il cosiddetto *Internet of Things* e i dispositivi digitali sono elementi sempre più presenti in tutti i settori economici, compreso il marittimo, progressivamente avviatisi verso una nuova "rivoluzione 4.0". Le priorità di medio-lungo periodo in tale ambito si concentrano su:

- connettività e comunicazione;
- supporto alla navigazione;
- valore aggiunto del carico utile;
- sicurezza (anche preventiva).

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

La rivoluzione digitale in ambito navale, a vantaggio di una accresciuta efficienza, dinamicità e capacità del settore di rispondere alla domanda di maggiori servizi, sarà resa possibile grazie a forti investimenti nello sviluppo di tecnologie di rilevamento e di monitoraggio (es. sensorizzazione, sistemi di connettività e comunicazione, quali comunicazione *ship-to-shore*, *ship-to-ship* o 5G, strumenti di modellizzazione, *twin-ship*) e da sistemi di supporto alla navigazione (es. *dinamic positioning / station-keeping,* sistemi di *automatic docking, situation awareness,* etc.) che hanno consentito il miglioramento generale dell'efficienza e della manovrabilità dei mezzi in qualsiasi condizione di esercizio e in diretto collegamento con le infrastrutture a terra. Nuove soluzioni per incrementare il valore aggiunto del carico utile (es. *automated payload management*, servizi personalizzati ai passeggieri, automazione, introduzione di tecnologie UxV, domotica, etc.) hanno poi rivestito una considerevole importanza in tale processo, a vantaggio della dinamicità economica del settore. Simili elementi innovativi in ambito digitale hanno reso inoltre necessario un rafforzamento sul fronte della cyber-security, la cui importanza si è accresciuta, unitamente alla possibilità di garantire una migliore sicurezza complessiva. La concentrazione della ricerca su misure volte a prevenire gli incidenti e a ridurne la frequenza, migliorando design, protocolli operativi, capacità resistenza e recupero della nave è diventata dunque indispensabile, anche alla luce di un più elevato livello di monitoraggio e controllo dei singoli componenti navali che permette una più puntuale definizione delle condizioni operative della nave.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

La ricerca in tale ambito è particolarmente approfondita con un rapido sviluppo tecnologico soprattutto con riferimento all'ambito della sensorizzazione, della connettività e comunicazione e dei sistemi di supporto alla navigazione. Una forte attenzione è posta inoltre al valore aggiunto del carico utile, probabilmente ora l'ambito di maggiore interesse e in grado di offrire le più consistenti opportunità economiche. Tuttavia, è bene sottolineare come allo stato attuale non esista

ancora una definizione del modello statico e dinamico della nave e dei suoi componenti, che accompagni la stessa lungo tutta la vita operativa della stessa. La realizzazione di sistemi ad alta complessità, pienamente integrati e gestiti lungo tutta la vita operativa, risulta quindi ancora lontana per il contesto navale, nonostante in altri settori industriali o civili siano già realizzai analoghi sistemi sensorizzati ed integrati.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 15

SOLUZIONE E TECNOLOGIE INNOVATIVE PER LA PROMOZIONE DELLA COMPLETA AUTOMAZIONE DELLA NAVE

Il tema della navigazione autonoma si sta delineando sempre più come una delle tendenze tecnologiche più importanti in ambito navale, in ragione anche delle considerevoli sfide di ricerca che caratterizzano tale argomento. Le priorità di medio-lungo periodo in tale ambito si concentrano su:

- integrazione di tecnologie su nave autonoma;
- conduzione *unmanned* dei mezzi navali.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Le innovazioni fondamentali per procedere verso la realizzazione di tecnologie abilitanti per la conduzione *unmanned* delle navi, si pongono come particolarmente complesse, sia con riferimento a mezzi di grandi dimensioni in contesti molto trafficati, sia per la gestione di mezzi piccoli a supporto ed estensione del range operativo della nave stessa (e.g. droni). A tal fine risulta quindi necessario:

- aumentare la pervasività del sistema di automazione;
- integrare nuovi sottosistemi/ funzioni e facendo evolvere i sistemi di supporto alle decisioni, da una natura "passiva", che si limita ad avvertire l'operatore di eventuali criticità, a una natura "attiva", che propone all'operatore un'azione per mitigare la criticità segnalata;
- migliorare l'intelligenza complessiva nel sistema, sia nel controllo degli impianti di bordo che nel controllo dei sistemi di navigazione e manovra;
- migliorare l'integrazione terra-bordo (per il monitoraggio/service da terra) e l'analisi delle performance sulla base dati di terra (*big data*).

Una tale evoluzione rende inoltre indispensabili ricerche approfondite in materia *cyber-security* sia delle reti di bordo che delle comunicazioni terra-nave, evitando possibili manomissioni o interferenze.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Recentemente, le principali attività di ricerca si sono essenzialmente focalizzate su alcuni temi di interesse fondamentale, vale a dire lo sviluppo di soluzioni per il supporto decisionale e lo studio di tecnologie relative al tema delle navi autonome. La questione del supporto decisionale costituisce una problematica in continua evoluzione con numerose ricerche in corso, legate soprattutto allo sviluppo di sistemi in grado di garantire la stabilità del mezzo, evitare le collisioni e garantire la sicurezza in mare di persone e mezzi. Per quanto riguarda il tema dei veicoli *unmanned*, numerosi progetti sono allo studio per promuovere diverse tipologie di veicoli, aerei, di superficie e subacquei. Devono infine essere menzionate le diverse attività per salvaguardare la sicurezza delle reti di comunicazione utilizzate (cyber-security) e la protezione ambientale.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 16

SOLUZIONE E TECNOLOGIE INNOVATIVE PER LA REALIZZAZIONE DI NUOVI MEZZI MARINI FINALIZZATI AL PIENO SVILUPPO DI DIVERSI PROMETTENTI SETTORI DELLA BLUE ECONOMY

La crescente richiesta di impiegare mezzi navali in condizioni sempre più complesse rende necessario migliorare l'indagine e la ricerca tecnologica per essere in grado di offrire strumenti atti a superare considerevoli difficoltà ambientali. Le priorità di medio-lungo periodo in tale ambito si concentrano su:

- mezzi per lo sfruttamento delle risorse marine (anche in contesti estremi);
- mezzi per lo svolgimento di operazioni complesse (anche in contesti estremi).

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Allo stato attuale, lo sviluppo di mezzi per lo sfruttamento delle risorse offerte dall'ambiente marino o lo svolgimento di operazioni complesse (es. impianti offshore, *deep-sea mining*, etc.) anche in contesti estremi (regioni artiche o con difficili condizioni metereologiche) si pongono come prioritari tra gli obiettivi di ricerca in tale ambito. L'ambiente marino emerge infatti sempre più come una preziosa risorsa in ragione della crescente limitatezza di disponibilità sulla terra ferma di alcune materie prime (principalmente gas naturale e metalli come rame, cobalto, oro, argento, manganese) che, unitamente al loro alto valore commerciale, sta rendendo interessanti gli investimenti in tecnologie estrattive in alto mare, anche in zone soggette a condizioni proibitive o in passato coperte da spesse calotte di ghiaccio. Si pone quindi al contempo la necessità che la ricerca proceda verso lo sviluppo di mezzi ad alto contenuto tecnologico, non solo per l'estrazione o la raffinazione a bordo ma anche per il supporto tecnico, offrendo capacità di grande complessità (es. posizionamento dinamico, perforazione in acque profonde, etc.).

Oltre a ciò si prevede nel lungo termine uno sviluppo sempre maggiore delle attività marittime (e.g. sfruttamento delle rinnovabili, sviluppo della pescicoltura, etc.) ed un trasferimento a mare di alcune attività al momento sviluppate a terra in contesti di elevata urbanizzazione. Gli stakeholder industriali del settore marittimo possono quindi essere pronti a fornire la tecnologia necessaria per lo sviluppo di tali modelli di business anche in contesti ambientali estremi

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

La cantieristica italiana, e in termini più generici quella occidentale, da diversi anni risponde a tali esigenze emergenti tramite un processo di specializzazione che ha portato alla costruzione di mezzi ad alto valore aggiunto, caratterizzati da elevati contenuti tecnologici. Tuttavia tale ambito di sviluppo dipende principalmente dal livello della domanda di settori di nicchia emergenti, Inoltre il settore del *deep sea mining* è particolarmente suscettibile alle oscillazioni di mercato dei prezzi delle materie prime, rendendo il processo di ricerca a tratti essenzialmente incostante e soggetto a numerose incognite. Ciononostante, i traguardi tecnologici raggiunti in questo set-

tore, se non immediatamente ad esso applicabili, hanno la forte possibilità di estendere i propri benefeci ad altre aree di sviluppo, incrementando il proprio valore aggiunto e riducendo i tempi necessari.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 17

SOLUZIONI E TECNOLOGIE INNOVATIVE PER LA TRANSIZIONE DEL PROCESSO PRODUTTIVO VERSO UNA MAGGIORE EFFICIENZA E SICUREZZA

La possibilità di disporre di siti di produzione sicuri, efficienti ed ecosostenibili rappresenta un elemento di grande importanza al fine di incentivare la competitività del settore su scala globale. Le priorità di medio-lungo periodo in tale ambito si concentrano su:

- industria 4.0;
- soluzioni tecniche innovative;
- *life cycle*;
- sicurezza.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

La rapida evoluzione tecnologica dei mezzi navali richiede indubbiamente un adeguamento dei processi e delle tecnologie costruttive per poter garantire alti livelli di qualità e sicurezza al prodotto, dando vita a processi produttivi innovativi e riducendo i costi, economici e ambientali, a vita intera. La ricerca in materia ha in effetti concentrato la propria attenzione soprattutto in riferimento all'automazione, a nuovi modelli computazionali, alla robotica industriale e a tecnologie ICT, unitamente al supporto di metodologie di progettazione basate sulla realtà virtuale (studio d'immagini, modellazione 3D da rilevato full-scale, realtà aumentata). Una simile evoluzione procede in tal senso verso un approccio olistico e circolare, mirato a promuovere soluzioni tecniche innovative (es. nuovi materiali e/o l'integrazione di materiali eterogenei, nuove soluzioni di pitturazione, saldatura laser-ibrido, *3D printing*, etc.) per assicurare l'integrazione tra progettazione e produzione, e considerare l'intero ciclo di esistenza della nave, dal design fino alla dismissione, con maggiore attenzione inoltre ai servizi post-vendita di supporto. Tale processo può essere inoltre supportato dalle tecnologie IT che intervengono migliorando l'integrazione tra le fasi di progettazione e costruzione, implementando tecnologie di maggiore sensorizzazione del processo produttivo e Big Data dello stesso al fine di monitorare il prodotto durante la sua costruzione e attraverso una modellazione life cycle della nave e dei suoi sistema che è destinata ad accompagnare l'intero arco di vita della stessa (*Digital Twin*). Grande interesse concerne inoltre la gestione del fine vita e dello smantellamento della nave nel quadro del processo di disassemblaggio e riciclo. Nel medio-lungo termine l'evoluzione dei nuovi processi produttivi dovrebbe quindi permettere il miglioramento dell'efficienza mediante l'aumento della capacità operativa dei cantieri, il contenimento del loro impatto ambientale e la riduzione dei costi per la manutenzione ed il controllo. Le nuove tecnologie potranno quindi premettere di raggiungere più elevati standard di sicurezza.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Nel panorama internazionale si registrano intense attività di ricerca, soprattutto nel settore della

robotica e della realtà virtuale. In tale ambito la realtà nazionale è probabilmente meno strutturata e coordinata tra i diversi attori del settore, sebbene esistano alcune aziende capaci di eccellere già oggi in numerose aree ad altissimo contenuto tecnologico e in grado di competere a livello globale.
Le capacità IT degli stakeholder nazionali potranno invece essere di supporto per il processo di maggiore informatizzazione dei processi produttivi, anche per il tramite del technology transfer da settori industriali non navali.

SETTORE 8

>BENI STRUMENTALI PER L'INDUSTRIA E I SERVIZI<

MEMBRI DEL GRUPPO DI LAVORO

Settore – Beni strumentali per l'industria e i servizi

Coordinatori	
POLITECNICO DI MILANO	**Francesco Jovane**
	Vincenzo Nicolò
Componenti	
FRAUNHOFER JLEAPT	**Doriana D'Addona**
MANUFUTURE	**Maurizio Gattiglio**
MCM	**Giuseppe Fogliazza**
POLITECNICO DI MILANO	**Giovanni Moroni**
PRIMA INDUSTRIE	**Paolo Sanna**
SINERGIE TECNOLOGICHE	**Giuseppe Lucisano**
SYNESIS	**Emanuele Carpanzano**
SMILAB	**Fabio Chiesa**
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II	**Roberto Teti**

Con la collaborazione di:

AITA – ASSOCIAZIONE ITALIANA TECNOLOGIE ADDITIVE	**Enrico Annacondia**
ANIMA – UFFICIO STUDI STUDI & CULTURA DI IMPRESA (UCIMU)	**Paolo Galloso**
SISTEMI PER PRODURRE	**Stefania Pigozzi**
CONFINDUSTRIA DISPOSITIVI MEDICI	**Ufficio Studi**

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 1

MACCHINE E SISTEMI DI PRODUZIONE INTELLIGENTI ECO-SOSTENIBILI SVILUPPATI SECONDO IL PARADIGMA DELLA SMART-FACTORY / INDUSTRY 4.0

Il settore manifatturiero sta vivendo una trasformazione. I principali acceleratori di innovazione attesi sono:

- la robotica avanzata collaborativa,
- la manifattura additiva (3D printing),
- "utensili" digitali avanzati disponibili come servizi cloud a basso costo.

L'estensione del concetto di "Internet of Things" - IoT al settore manifatturiero è l'elemento fondante per la realizzazione del paradigma della Smart-Factory.
L'elemento fondante di questa transizione risiede nella rivisitazione dei modelli classici, a base gerarchica, di gestione dell'automazione di fabbrica.
Tradizionalmente la piramide dell'automazione è un paradigma utilizzato per descrivere i diversi livelli di una soluzione manifatturiera. Questo modello, basato su una "struttura rigidamente gerarchica", risulta però inadeguato per rappresentare una situazione dove un ampia autonomia è lasciata ai CPS.
Il paradigma della Smart-Factory suggerisce quindi l'esplorazione delle seguenti tematiche:

1) Standard e Piattaforme software aperte per l'architettura di riferimento.
2) Strumenti di gestione, modellazione, simulazione e forecasting che basati sullo sviluppo di un duale digitale di tutto ciò che agisce nella fabbrica. Il gemello digitale dovrà poter essere più arricchito ed evolversi, anche mediante logiche di intelligenza artificiale, acquisendo esperienza dall'effettivo funzionamento della fabbrica per un affinamento continuo del modello.
3) Sviluppo e implementazione di infrastrutture industriali a banda larga che permettano lo scambio degli alti volumi di dati previsti dalla realizzazione del paradigma della Smart-Factory .
4) Training e sviluppo continuo delle competenze professionali.
5) Lo sviluppo di sistemi di analisi prestazionale.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Lo scenario dove le tecnologie digitali rendono possibile lo sviluppo di un ambiente smart in cui beni strumentali, magazzini, layout/sistemi intralogistici e processi che presentano una integrazione, basata su un uso pervasivo dell'ICT, dalla logistica inbound alla consegna dei prodotti si sta già realizzando.
Questo scenario permette una configurazione flessibile del sistema di produzione, capace di me-

glio gestire i requisiti dei clienti e di presentare un elevato grado di resilienza a fattori esterni ed interni.

I risultati attesi dall'implementazione del concetto di Smart-Factory, sono:

- Il soddisfacimento dei requisiti individuali dei clienti ("Mass Customisation");
- La flessibilità e configurazione dinamica della fabbrica;
- L'implementazione di un meccanismo di gestione dove la fabbrica, in ogni sua dimensione, diventa un oggetto trasparente per il decision-maker;
- L'ottimizzazione continua della produzione, caso per caso, producendo il massimo output per volume di risorse impiegate;
- La possibilità di sviluppare nuovi servizi B2B che possano integrarsi con la Smart-Factory.

Gli aspetti qualificanti questa tecnologia prioritaria hanno rilevanza anche per lo sviluppo di una economia circolare, come indicato esemplificativamente nella tabella seguente:

ASPETTI QUALIFICANTI	RILEVANZA PER L'ECONOMIA CIRCOLARE
ROBOTICA AVANZATA COLLABORATIVA,	Nell' economia circolare le situazioni di riparazione e ripristino delle funzioni d'uso dei prodotti non sono standard. La necessità di operare in condizioni non standard richiederà un elevato grado di collaborazione tra gli operatori umani e gli esecutori meccanici.
MANIFATTURA ADDITIVA (3D PRINTING)	La manifattura additiva potrà rendere disponibili localmente la ricambistica e le parti necessarie per l'aggiornamento dei prodotti nei cicli di riparazione e aggiornamento dei prodotti
"UTENSILI" DIGITALI AVANZATI DISPONIBILI COME SERVIZI CLOUD A BASSO COSTO	Il futuro della economia circolare è basato sulla creazione e gestione di opportune piattaforme che si avvantaggiano della disponibilità di questi strumenti. La "value proposition" dei nuovi business non sarà la vendita di prodotti ma la loro accessibilità tramite queste piattaforme.
L'ESTENSIONE DEL CONCETTO DI "INTERNET OF THINGS"	L'IoT sarà lo strumento che permetterà di tracciare lo stato dei materiale e prodotti in circolo.
BIG DATA ANALITYCS	Fondamentale per estrarre dai dati raccolti tramite IoT le correlazioni che è necessario individuare per gestire i flussi dell'Economia circolare.
PARADIGMA DELLA SMART FACTORY	Nell'Economia circolare si continuano a fabbricare prodotti da immettere nei suoi cicli sia partendo da materie prime sia operando su prodotti da ricondizionare. L'efficienza di questo segmento di attività è importante e verosimilmente si giova dallo sviluppo di questo paradigma paradigma che andrà comunque esteso nel significato esteso che essa prende nell'economia circolare

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

In Germania è stato sviluppato il programma strategico "Industrie 4.0" concentrato sulla componente digitale della 4a rivoluzione industriale. Il programma riprende molti dei temi precedentemente discussi inquadrandoli nel contesto economico manifatturiero tedesco molto diverso ad esempio per la dimensione media delle imprese germaniche decisamente superiore dagli altri sistemi manifatturieri europei.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

Data la complessità e le interconnessioni del manifatturiero digitale del futuro con altre tecnologie abilitanti (IoT, Big Data, CPS, robotica, fotonica, 3D printing, ecc.) è difficile identificare separatamente un numero. Si ritiene però che ad esempio i fondi necessari per l'implementazione di una rete nazionale Broadband sia una condizione necessaria alla quale occorrerà affiancare investimenti in piattaforme aperte e accessibili alle PMI e supportare l'attività di ricerca tecnologica per complessivi alcuni B€.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 2

KNOWLEDGE BASED DESIGN: NUOVI STRUMENTI AD ALTO CONTENUTO DI CONOSCENZA PER LA PROGETTAZIONE, SIMULAZIONE E MESSA IN PRODUZIONE DI PRODOTTI AVANZATI

Con riferimento alla rappresentazione e modellazione delle informazioni dei prodotti e processi, la condivisione di dati e protocolli rappresenta ancora una tematica gestita in modo parziale e destrutturato. Il raggiungimento di una completa interoperabilità all'interno della singola fabbrica e nella filiera si basa sulla definizione di standard per la formalizzazione delle informazioni che consentano di descrivere la conoscenza per molteplici categorie di prodotti. Tali standard dovrebbero, inoltre, essere concepiti in modo incrementale con l'obiettivo di poter integrare le frequenti innovazioni.

Un aspetto chiave di questa tecnologia prioritaria è relativo alla rappresentazione e modellazione delle informazioni dei prodotti e processi, nonché alla condivisione di dati e protocolli, attraverso standard concepiti in modo incrementale, per poter integrare le frequenti innovazioni, e per includere conoscenza al di là dei dati geometrici e tecnologici.

Ciò comporta la necessità di concepire nuovi strumenti di progettazione orientati alla conoscenza, in grado di riconoscere le parti da produrre sulla base delle loro scansioni 3D, di ricostruirne la geometria e di identificare la famiglia di lavorazioni da eseguire ed i relativi processi produttivi che consentono il raggiungimento dei requisiti di qualità e prestazioni meccaniche nella maniera più efficiente.

Le fabbriche evolutive, ed integrate in reti di fornitura globali, oltre a richiedere tra i propri elementi abilitanti modularità e riuso, dovranno essere intelligenti. Sulla base dei dati rilevati dal campo, la fabbrica evolutiva dovrà essere in grado di interpretare le informazioni ed implementare in modo autonomo strategie adattative e di riparazione modificando le proprie prestazioni, i propri modi e dinamiche operative, nonché le politiche di pianificazione, gestione ed ottimizzazione della produzione.

L'innovazione in tema di progettazione e configurazione di macchine e dispositivi dovrà dare priorità ai seguenti aspetti:

- Nuovi approcci e strumenti di progettazione a supporto dell' adattabilità e riconfigurabilità di sistemi produttivi, macchine ed attrezzature, sistemi di controllo e di gestione della produzione, sia dal punto di vista fisico che logico.
- Sviluppo di metodologie e strumenti a supporto della progettazione integrata di prodotti e processi produttivi in grado di adattarsi alle evoluzioni del mercato.
- Ideazione di approcci di ottimizzazione del funzionamento della fabbrica che ne riguardino i diversi livelli e che si basino su logiche ed obiettivi innovativi dall'aspetto energetico a quello cognitivo a supporto del miglioramento continuo.

In relazione agli strumenti software a supporto della progettazione dei prodotti e dei relativi processi, le principali azioni di innovazione dovrebbero riguardare i seguenti aspetti chiave. Innanzitutto gli strumenti CAD/CAM dovrebbero consentire di incorporare un contenuto informativo arricchito rispetto alle famiglie di dati geometrici e tecnologici. Ciò comporta la capacità di riconoscere le parti sulla base delle loro scansioni 3D, di ricostruirne la geometria e di identificare la famiglia di lavorazioni da eseguire ed i relativi processi produttivi che consentono il raggiungimento dei requisiti di qualità e prestazioni meccaniche nella maniera più efficiente. Inoltre, la crescente diffusione di assiemi costituiti da componenti in materiali diversi sia dal punto di vista chimico che tecnologico e funzionale rappresenta una sfida complessa per i sistemi CAD/CAM di nuova generazione che saranno chiamati a includere logiche di progettazione ibrida per metalli, compositi e plastiche.

Congiuntamente alla modellazione ed analisi di parti complesse, tali strumenti dovranno anche consentire nella fase di progettazione di processo produttivo l'integrazione di modelli cinematici e dinamici delle macchine che realizzano le lavorazioni come pure di fenomeni tradizionalmente considerati secondari ma che solo recentemente sono stati identificati come cruciali nel processo, come per esempio la modellazione fluidodinamica, meccanica e chimica dei vari liquidi di raffreddamento. Ciò renderebbe possibile l'utilizzo di modelli matematici innovativi basati su una modellazione completa delle risorse fisiche che partecipano il processo manifatturiero. In tal senso l'obiettivo di efficienza energetica potrebbe essere perseguito mediante modellazioni avanzate che coinvolgono la progettazione del prodotto, la definizione del processo di lavorazione nonché delle risorse fisiche che implementano il processo stesso.

Nella fase di progettazione, inoltre, i vari strumenti software utilizzati dovrebbero essere coordinati così che ogni modifica realizzata nella fase di progettazione geometrica o di processo possa essere automaticamente inclusa negli altri strumenti software. Questa interazione non dovrebbe essere solo trasversale agli strumenti, ma dovrebbe poter essere connessa con le risorse fisiche che in un tale momento operano le trasformazioni stesse. La chiusura dell'anello logico sulle macchine reali dei sistemi produttivi consentirebbe di interpretare la reale esecuzione del processo e, sulla base della nuova conoscenza e delle previsioni sul comportamento reale delle macchine, adattare in tempo reale le variabili significative che riguardano la progettazione del prodotto e del processo.

Gli strumenti CAD/CAM di nuova generazione dovrebbero inoltre essere progettati in modo da consentirne un uso semplice ed efficace, con interfacce che supportino le dinamiche interattive con l'utilizzatore, anche durante le fasi di realizzazione del processo in macchina. La possibilità di poter integrare nuove informazioni che arricchiscano e migliorino le fasi progettuali deve poter esplicarsi non solo nel dipartimento di progettazione ma anche a bordo macchina. Pertanto tali strumenti dovrebbero consentire una diversificazione delle interfacce, delle funzioni e delle modalità di fruizione dei dati a seconda delle modalità di utilizzo e della tipologia di utilizzatore.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

La produzione on-demand di prodotti complessi in reti di fornitura globale rappresenta una sfida da cui le aziende manifatturiere potranno uscire vincenti solo se saranno in grado di mettere in

atto nuove strategie di progettazione ed utilizzo di tutte le componenti del sistema produttivo.
La possibilità di utilizzare standard e strumenti evoluti a supporto della progettazione comporta numerosi benefici per le aziende
In prima istanza, la condivisione di formati dati e modalità di rappresentazione riduce drasticamente gli errori dimensionali, di tolleranze e di parametri di processo, contribuendo ad una compressione temporale della fase di progettazione ed una riduzione delle iterazioni tra i vari players della filiera produttiva.
L'utilizzo di strumenti di progettazione in cui incorporare modellazioni evolute delle risorse ed algoritmi che rispondono ad i più recenti obiettivi produttivi (come l'ottimizzazione del consumo energetico) consentano di eseguire analisi più accurate e rapide a supporto della definizione delle specifiche progettuali garantendo una maggiore qualità dei prodotti ed efficienza dei processi.
Infine, la capacità di integrare modifiche progettuali trasversalmente a diversi strumenti così come interpretare le informazioni dal campo nella fase di realizzazione effettiva dei processi produttivi convergerebbero a favore di un percorso di miglioramento continuo di prodotti, processi e sistemi produttivi e di conseguente riduzione dei costi dovuti a scarti, guasti e ritardi.
Lo sviluppo di soluzioni innovative di dispositivi, macchine e sistemi di produzione che rispondano ai paradigmi progettuali di riconfigurabilità, flessibilità ed adattabilità porterebbe ai seguenti benefici.
In prima istanza, l'utilizzo di soluzioni intelligenti che adattino le proprie caratteristiche sulla base della domanda produttiva e dello stato del sistema nel tempo permette di ridurre drasticamente gli interventi manuali legati all'implementazioni delle modifiche con conseguente riduzione di tempi e costi ad essi collegati.

Globalmente le soluzioni di nuova generazione risulterebbero notevolmente più performanti dal punto di vista del throughput, del consumo energetico e della qualità garantita di prodotti e processi. La latenza delle informazioni da condividere nella fabbrica verrebbe compressa mediante le nuove architetture ICT a servizio della produzione così da favorire una rapida ed efficiente diffusione delle modifiche attraverso i vari livelli della fabbrica.
Inoltre, il concetto di prodotto (dispositivo, macchina e sistema) non sarebbe più unicamente rappresentato dalla specifica risorsa fisica realizzata dal costruttore ed utilizzata dal cliente, ma sarebbe corredato di una serie di servizi integrativi a supporto della gestione della riconfigurabilità nel tempo così come di attività volte alla ottimizzazione delle prestazioni di sistema. Le dinamiche di cooperazione tra i costruttori ed utilizzatori si articolerebbero in una sinergia duratura nel tempo in cui si condividono i benefici, rischi e costi dell'innovazione.
Infine, la disponibilità di metodologie e strumenti integrati a supporto della progettazione e gestione di tali soluzioni lungo il loro ciclo di vita, consentirebbe di rispondere alle richieste dei clienti in modo competitivo per tempi e costi, ovvero garantendo tempi drasticamente ridotti per la concezione, sviluppo ed implementazione della soluzione e riducendo i costi legati agli eccessi di flessibilità ed al sovradimensionamento delle risorse.
Infine, la capacità di integrare modifiche progettuali trasversalmente a diversi strumenti così come interpretare le informazioni dal campo nella fase di realizzazione effettiva dei processi produttivi convergerebbero a favore di un percorso di miglioramento continuo di prodotti, processi e

sistemi produttivi e di conseguente riduzione dei costi dovuti a scarti, guasti e ritardi.
Gli aspetti qualificanti questa tecnologia prioritaria hanno rilevanza anche per lo sviluppo di una economia circolare, come indicato esemplificativamente nella tabella seguente:

ASPETTI QUALIFICANTI	RILEVANZA PER L'ECONOMIA CIRCOLARE
Nuovi approcci e strumenti di progettazione a supporto dell' adattabilità e riconfigurabilità di sistemi produttivi, macchine ed attrezzature, sistemi di controllo e di gestione della produzione, sia dal punto di vista fisico che logico.	La necessità di sviluppo in quest'area è vieppiù importante nel quadro dell'Economia circolare
Sviluppo di metodologie e strumenti a supporto della progettazione integrata di prodotti e processi produttivi in grado di adattarsi alle evoluzioni del mercato.	Bisogna tener conto che è un corollario della economia circolare che il mercato richieda servizi e non prodotti e che i prodotti assumono tendenzialmente il ruolo di beni strumentali
Ideazione di approcci di ottimizzazione del funzionamento della fabbrica che ne riguardino i diversi livelli e che si basino su logiche ed obiettivi innovativi dall'aspetto energetico a quello cognitivo a supporto del miglioramento continuo.	Come detto relativamente al paradigma della Smart-Factory nell'Economia circolare si continuano a fabbricare prodotti da immettere nei suoi cicli sia partendo da materie prime sia operando su prodotti da ricondizionare. L'efficienza di questo segmento di attività è importante e verosimilmente si giova dallo sviluppo di questo paradigma che andrà comunque esteso nel significato esteso che essa prende
Contenuto informativo arricchito rispetto alle famiglie di dati geometrici e tecnologici.	Nel caso della Economia circolare questi contenuti potrebbero ad esempio riguardare le funzionalità delle parti e le loro modalità di mantenimento. Gli obiettivi sono: • ridurre la quantità di materiali necessari per fornire un particolare servizio (alleggerimento); • allungare la vita utile dei prodotti (durata); • ridurre l'uso di energia e materiali nelle fasi di produzione e di utilizzo (efficienza); • ridurre l'uso di materiali pericolosi o difficili da riciclare in prodotti e processi produttivi (sostituzione); • progettare prodotti che siano più facili da mantenere, riparare, aggiornare, rigenerare o riciclare (ecodesign).
Capacità di riconoscere le parti sulla base delle loro scansioni 3D, di ricostruirne la geometria e di identificare la famiglia di lavorazioni da eseguire ed i relativi processi produttivi che consentono il raggiungimento dei requisiti di qualità e prestazioni meccaniche nella maniera più efficiente	Nel caso della Economia circolare capacità di questo tipo potrebbero facilitare le operazioni di manutenzione e ricostruzione e sostituzione di parti
Capacità di gestione di logiche di progettazione ibrida per metalli, compositi e plastiche.	Queste logiche potrebbero includere la considerazione delle possibilità di separazione dei materiali in fase di riciclo
I integrazione di modelli cinematici e dinamici delle macchine che realizzano le lavorazioni compresa la modellazione fluidodinamica, meccanica e chimica dei vari liquidi di raffreddamento.	In tal senso l'obiettivo di efficienza energetica potrebbe essere perseguito mediante modellazioni avanzate che coinvolgono la progettazione del prodotto, la definizione del processo di lavorazione nonché delle risorse fisiche che implementano.

TAB. 1

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Nonostante il concetto di produzione su richiesta vede la sua comparsa negli anni '80, la sua completa implementazione è solo in parte stata realizzata. Dal punto di vista industriale, infatti, i forti investimenti in equipaggiamento ed il know-how legato alla gestione degli impianti ne hanno severamente limitato la diffusione.

Esempi moderni di produzione on-demand riguardano spesso soluzioni produttive caratterizzate da famiglie di prodotti limitate così da abbattere la complessità di gestione dei magazzini, nonché la complessità produttiva legata alla realizzazione di numerosi set-up ed attrezzaggi di sistema.

Con riferimento specifico al tema della progettazione di macchine, sistemi, e dispositivi, le principali innovazioni allo stato dell'arte riguardano la possibilità di configurare macchine con materiali innovativi ed integrando logiche di monitoraggio energetico indirette, ovvero derivate dal comportamento dinamico della macchina durante il processo di lavorazione. Tuttavia non esistono ancora approcci robusti di progettazione che generino soluzioni di macchine dove le logiche di ottimizzazione energetica siano direttamente implementate come funzioni di controllo.

La fase di progettazione di prodotti e processi è tuttora gestita con soluzioni fortemente proprietarie di strumenti CAD/CAM. Tuttavia esiste una elevata latenza nell'integrazione di nuovi standard negli strumenti commerciali il che comporta un effetto negativo sull'interoperabilità degli strumenti CAD/CAM o altri software prodotti da fornitori diversi.

In aggiunta, le soluzioni software commerciali non sono ancora mature per una gestione dinamica ed interattiva delle informazioni e delle modifiche durante il ciclo di vita dei prodotti, rallentando significativamente i tempi di progettazione ed industrializzazione degli stessi.

La integrazione degli strumenti CAD/CAM con modellazioni matematiche di processi e risorse è ancora oggi una attività gestita nel campo della ricerca mediante lo sviluppo di specifici modelli e soluzioni software. Analogamente, l'integrazione di strumenti CAD/CAM con tecniche di riconoscimento visivo che hanno come obiettivo la definizione di prodotti e processi performanti e conseguente diagnostica di sistema risulta affrontato in maniera ancora preliminare sia a livello di ricerca che ancor più nelle applicazioni industriali.

Sul tema della configurazione di sistema, si opera principalmente sullo sviluppo di soluzioni analitiche complesse che utilizzano politiche predittive ed alberi degli scenari per modellare le evoluzioni della domanda e determinino un set di soluzioni di sistemi produttivi nel tempo. La modellazione analitica viene solitamente associata ad una fase di valutazione delle prestazioni dei sistemi che spesso si serve di tecniche di simulazione ad eventi discreti. Questo approccio consente di effettuare valutazioni strutturate nel tempo ma generalmente si basa su una conoscenza aprioristica a supporto della definizione degli scenari futuri.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

65 milioni di euro

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 3

GESTIONE DEI SISTEMI PRODUTTIVI: METODI E STANDARD PER LA AUTOMAZIONE ED INTEGRAZIONE DI SISTEMI PRODUTTIVI COMPLESSI

La produzione di prodotti complessi e fortemente modulari, le cui specifiche sono veicolate dal consumatore, rappresenta generalmente una sfida per le aziende del manifatturiero. Questa strategia produttiva, che si va estendendo (con le dovute proporzioni) anche verso i prodotti di largo consumo nel settore "food&beverage", è infatti caratterizzata da notevoli costi di investimento per la realizzazione di soluzioni produttive fortemente agili nonché da elevati costi operativi e costi di gestione delle scorte.

Per ridurre il rischio associato ad una produzione fortemente variabile le imprese competitive tenderanno ad orientarsi verso soluzioni di fabbriche che producono on-demand o che siano n grado di adattare formati e caratteristiche del prodotto in tempi e costi ridottissimi. Tale politica produttiva si affiderà ad infrastrutture ICT che garantiscano il continuo flusso informativo attraverso le varie fasi del ciclo di vita dei prodotti -dalla loro progettazione alla produzione e distribuzione- come pure attraverso i vari livelli della fabbrica.

Per garantire un comportamento agile dei sistemi, le soluzioni di automazione dovranno essere caratterizzate da architetture distribuite che consentano un utilizzo differenziato delle varie porzioni del sistema produttivo così come rapide riconfigurazioni.

La nuova generazione di sistemi di produzione dovrà essere concepita sulla base di requisiti di intelligenza ed adattatività per far fronte a dinamiche produttive complesse e variabili nel tempo. Tali sistemi saranno inoltre chiamati ad evolvere lungo il proprio ciclo di vita adattando le proprie caratteristiche e comportamento operativo sulla base dei requisiti produttivi garantendo l contemporaneamente livelli elevati di efficienza e di salute delle risorse del sistema.

Ciò comporta soluzioni modulari su diversi livelli, dal dispositivo meccatronico ad intere celle produttive, per consentirne un utilizzo differenziato in accordo con le esigenze produttive nonché permettere una rapida riconfigurazione, sostituzione ed integrazione delle risorse esistenti con nuove porzioni di sistema. I moduli faranno affidamento a tecnologie innovative a supporto dell'automazione e gestione, dal controllo e supervisione alla diagnosi e manutenzione delle risorse. Tali tecnologie dovranno supportare il continuo campionamento e la interpretazione dei dati dal campo per costruire una immagine dello stato istantaneo del sistema nel tempo ed identificare eventuali le azioni opportune.

Lo sviluppo di nuovi paradigmi produttivi sta inoltre evidenziando una possibile collaborazione tra uomo e macchina (in particolare con robot antropomorfi) sulle stesse aree di lavoro attribuendo alla macchina un ruolo di assistente non specializzato. Si delineano quindi ambienti di lavoro collaborativo a volte anche molto complessi. In un tale contesto evolutivo, fortemente competitivo e dinamico, i processi di fabbricazione dovranno fare sempre maggiore affidamento sulle capacità umane coinvolgendo gli operatori sia fisicamente sia intellettualmente nella gestione e nella con-

duzione del processo stesso. La necessità di rendere sempre più usabili gli strumenti a disposizione dell'operatore in un ambiente gradevole e non stressante porta a una revisione ergonomica delle interfacce uomo macchina ed all'introduzione sempre più spinta di sistemi logistici intelligenti integrati a specifiche fasi del processo produttivo.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

La produzione on-demand rappresenta una strategia con notevoli benefici per le aziende. Essa, infatti, consente una riduzione drastica delle scorte ed un profondo cambiamento degli approcci produttivi tradizionalmente orientati al make-to-stock. I rischi ed i costi associati alle giacenze o la mancata vendita di lotti produttivi di parti finite viene drasticamente contenuto.

In aggiunta, le aziende hanno più ampio margine per rinnovare continuamente il portfolio di prodotti sfruttando l'agilità e le leve di riconfigurabilità dei sistemi di produzione.

L'adozione di tecnologie a supporto dell'integrazione dei diversi livelli logici della fabbrica, dal controllo e supervisione alla diagnostica e manutenzione, costituisce una forte leva competitiva per le aziende.

Le soluzioni produttive di nuova generazione ne risulterebbero avvantaggiate in primo luogo dal punto di vista produttivo dal momento che si ridurrebbero i tempi ed i costi legati agli scarti di prodotti che derivano da processi produttivi degradati o non ottimizzati. Inoltre, le risorse fisiche che operano nello shop-floor verrebbero costantemente monitorate e controllate con l'obiettivo di implementare politiche correttive e di miglioramento dell'efficienza e dell'aderenza funzionale/prestazionale tra obiettivo e risultato. Ciò comporterebbe notevoli benefici in termini di riduzione dei guasti e delle inefficienze mediante l'utilizzo di tecnologie basate sull'apprendimento che consentono di modellare il ciclo di degradazione naturale delle risorse congiuntamente a fenomeni esogeni. In aggiunta, l'adozione di soluzioni di automazione fortemente integrate con i livelli di gestione e monitoraggio consentirebbe una drastica riduzione dei tempi di diagnostica ed identificazione di eventuali comportamenti fuori controllo dei sistemi, favorendo quindi l'implementazione di politiche ed azioni di correzione.

Infine un ulteriore beneficio sarebbe rappresentato da una elevata reattività al cambiamento. Eventuali modifiche legate alla domanda di produzione piuttosto che riconfigurazioni di sistema o cambiamenti di logiche produttive potrebbero essere gestite con tempi di ramp-up e set-up drasticamente inferiori come risultato di una condivisione trasversale e congiunta delle funzioni di controllo, monitoraggio e gestione.

Gli aspetti qualificanti questa tecnologia prioritaria hanno rilevanza anche per lo sviluppo di una economia circolare, come indicato esemplificativamente nella tabella seguente:

ASPETTI QUALIFICANTI	RILEVANZA PER L'ECONOMIA CIRCOLARE
Obbiettivo di garantire un comportamento agile dei sistemi, le soluzioni di automazione dovranno essere caratterizzate da un'architettura distribuita che consenta un utilizzo differenziato delle varie porzioni del sistema produttivo così come rapide riconfigurazioni	L'Economia circolare prevede una maggior distribuzione sul territorio delle attività produttive. L'economia circolare tende a richiedere una maggiore agilità nelle operazioni di riqualificazione delle risorse
Collaborazione tra uomo e macchina (in particolare con robot antropomorfi) sulle stesse aree di lavoro attribuendo alla macchina un ruolo di assistente non specializzato	Non di specifica rilevanza per L'economia circolare., tuttavia anche nel caso della Economia circolare capacità di questo tipo potrebbero facilitare le operazioni di manutenzione e ricostruzione e sostituzione di parti
Concepire una nuova generazione di sistemi di produzione sulla base di requisiti di intelligenza ed adattatività per far fronte a dinamiche produttive complesse e variabili nel tempo.	Obiettivo congruenti con quelli della economia circolare
Sistemi chiamati ad evolvere lungo il proprio ciclo di vita adattando le proprie caratteristiche e comportamento operativo sulla base dei requisiti produttivi e contemporaneamente garantendo livelli elevati di efficienza e di salute delle risorse del sistema.	Obiettivo congruenti con quelli della economia circolare

TAB. 2

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

La produzione flessibile e on-demand presenta di sicuro numerosi elementi di complessità. Esempi sono la selezione delle risorse fisiche da utilizzare nel sistema produttivo, la progettazione di un sistema di automazione estremamente performante e soluzioni di gestione della produzione orientate alla minimizzazione del lead-time.

Nonostante il concetto di produzione su richiesta vede la sua comparsa negli anni '80, la sua completa implementazione è solo in parte stata realizzata. Dal punto di vista industriale, infatti, i forti investimenti in equipaggiamento ed il know-how legato alla gestione degli impianti ne hanno severamente limitato la diffusione.

Esempi moderni di produzione on-demand riguardano spesso soluzioni produttive caratterizzate da famiglie di prodotti limitate così da abbattere la complessità di gestione dei magazzini, nonché la complessità produttiva legata alla realizzazione di numerosi set-up ed attrezzaggi di sistema. Questi aspetti, se non ottimizzati in modo strutturato, costituiscono fonti di inefficienza di difficile risoluzione. Essi hanno infatti attirato l'attenzione del mondo della ricerca per numerosi anni con l'obiettivo di sviluppare soluzioni di impianti automatizzati caratterizzati da elevatissimi troughput ed affidabilità.

Le soluzioni di controllo, manutenzione e gestione della produzione sono solitamente indipendenti tra loro. Ciascun livello logico della fabbrica risponde quindi a politiche miopi di controllo ed ottimizzazione, senza considerare in modo strutturato l'impatto esteso di una specifica scelta. Ciò comporta la realizzazione di task disgiunti che spesso rispondono a logiche in disaccordo tra loro, causando complessivamente svariate inefficienze nei sistemi produttivi nonché tempi troppo lunghi per diagnosticare e reagire ad eventuali comportamenti anomali delle risorse.

Benché la progettazione di soluzioni metodologiche e tecnologiche che supportino la gestione della fabbrica su livelli molteplici sia di condivisa importanza, la complessità realizzativa che da essa scaturisce non è stata ancora affrontata in modo verticale e completo. Esistono numerose

attività di ricerca nella direzione di arricchire le tradizionali tecnologie di controllo, manutenzione, diagnostica e gestione con soluzioni evolute basate sull'analisi dello stato reale del sistema e la sua conseguente correzione di anomalie. Tuttavia, tali attività fanno generalmente riferimento a problematiche molto specifiche, come per esempio il controllo adattativo e la manutenzione predittiva.

Con riferimento ad applicazioni industriali esistono rari esempi di eccellenza in Italia nell'integrazione di diverse tecnologie a supporto di sistemi produttivi intelligenti ed adattativi. Tali esempi si fondano su una forte integrazione di know-how nei campi della meccanica, elettronica, robotica e gestione degli impianti. Le aziende che sfruttano questi aspetti in modo competitivo costituendo poli di eccellenza mondiale appartengono sovente al mondo dei costruttori di risorse ed integratori di sistemi.

Di contro, nella grande maggioranza dei casi, le aziende che non hanno una conoscenza approfondita e puntuale delle risorse hardware che operano nello shop-floor riescono difficilmente a definire politiche congiunte di miglioramento dell'efficienza del sistema lungo il suo ciclo di vita.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

65 milioni di euro

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 4

LOGISTICA E DISTRIBUZIONE: METODI E TECNOLOGIE ICT BASATE SU INTERNET PER LA INTEGRAZIONE IN TEMPO REALE DEGLI ATTORI DELLA FILIERA DAL RETAIL, AI PRODUTTORI, AI FORNITORI

Le tendenze dell'attuale modello di sviluppo economico richiedono lo sviluppo di nuove soluzioni ICT basate su Internet per integrare in tempo reale gli attori della filiera: dall'utente, al punto vendita, al distributore, al produttore, ai fornitori di semilavorati, componenti, materiali e tecnologie, risalendo sino ai designer ed ai progettisti dei prodotti stessi. In particolare:

- il sistema del retail, in stretto contatto con i consumatori finali, deve essere in grado di rilevare e trasmettere ai produttori le esigenze dei consumatori in modo veloce ed efficace;
- i produttori devono recepire con continuità le aspettative del mercato e devono essere capaci di progettare e produrre nuovi prodotti per soddisfare tali esigenze, in tempi molto brevi, riducendo al minimo le interazioni successive con i propri fornitori;
- i fornitori devono potere cogliere in tempo reale le esigenze dei produttori al fine di potere fornire agli stessi semilavorati, componenti, materiali e tecnologie che ne soddisfano le esigenze riducendo il numero ed i tempi delle interazioni.

Nel contesto dei vincoli imposti dalle esigenze e dinamiche di mercato, è indispensabile riuscire a tenere in considerazione contemporaneamente sia i tradizionali aspetti di produttività che quelli di sostenibilità, economica, energetica ed ambientale. Ne deve risultare un quadro di equilibrio virtuoso della fabbrica, in cui le soluzioni adottate per soddisfare le esigenze dei clienti vengono interpretate e diventano anche elementi abilitanti per il miglioramento progressivo dell'intero processo produttivo.

Questo implica ovviamente un adeguamento delle componenti di logistica (interna ed esterna alla fabbrica), necessarie per supportare e garantire il corretto funzionamento del sistema produttivo, ed un coinvolgimento diretto del sistema di interazioni con fornitori e distributori.

Dal punto di vista tecnologico si tratta di integrare nell'attuale architettura ICT dell'azienda nuovi strumenti software di pianificazione, basati sul recupero e la combinazione di informazioni eterogenee ad ogni livello della fabbrica, che siano in grado di valutare in tempo reale strategie differenti (piani di produzione, ottimizzazione delle risorse, modifiche di layout, ...) per mantenere elevata la produttività a fronte di variazioni, anche consistenti, nelle condizioni al contorno del mercato. L'obiettivo è quello di combinare principi sia lean che green, migliorando ad un tempo, la qualità del prodotto, i tassi di produzione, il tempo di attraversamento e la flessibilità dei sistemi di produzione, riducendo energia, materiali utilizzati, scarti e prodotti inquinanti.

Si tratta in definitiva di creare una rete di fornitura sostenibile (sia economicamente che dal punto di vista energetico/ambientale) che sia in grado di ristrutturare velocemente e dinamicamen-

te i collegamenti all'interno dell'insieme di unità produttive e distributive, distribuite geograficamente ma elettronicamente collegate, in una sorta di fabbrica virtuale estesa. Questo approccio permetterebbe l'instaurarsi di una supply network con caratteristiche avanzate di alto livello di customizzazione, tempi ciclo ridotti, costi di magazzino quasi nulli, oltre che naturalmente flussi di materiali ed energia ottimizzati durante la produzione e la distribuzione.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Nel corso dell'ultima decade le sfide imposte a livello industriale dal processo ancora in corso di globalizzazione economica hanno indotto una significante riduzione del rapporto produzione/importazione di prodotti, in particolare nei settori con processi manifatturieri ad alto contenuto di manodopera.

La competizione sul prezzo ha portato i grossi player a spostare la produzione in paesi con costi di manodopera più bassi, mentre le piccole e medie imprese passive hanno dovuto ammettere la sconfitta e chiudere le loro fabbriche, laddove le PMI più innovative hanno cercato di reagire muovendosi verso un modello produttivo in grado di rispondere in modo più puntuale all'incerta e fortemente variabile richiesta dei clienti. È per quest'ultime che lo sviluppo di tecnologie atte ad aumentare la flessibilità e reattività della produzione può avere un forte impatto sulla competitività, mettendole in grado di offrire al mercato tempi di reazione impossibili da raggiungere attraverso un approccio classico, coinvolgendo in modo diretto nel processo di efficientamento ed aumento della flessibilità anche gli altri attori della filiera e rispettando le condizioni di sostenibilità delle attività produttive e logistiche.

Gli aspetti qualificanti questa tecnologia prioritaria hanno rilevanza anche per lo sviluppo di una economia circolare, come indicato esemplificativamente nella tabella seguente:

ASPETTI QUALIFICANTI	RILEVANZA PER L'ECONOMIA CIRCOLARE
Nuove soluzioni ICT basate su Internet per integrare in tempo reale gli attori della filiera: dal consumatore, al punto vendita, al distributore, al produttore, ai fornitori di semilavorati, componenti, materiali e tecnologie, risalendo sino ai designer ed ai progettisti dei prodotti stessi.	Nel caso della economia circolare l'ottica cambia non dovendosi facilitare un consumo ma un servizio, Si parlerà quindi di utenti anziché di consumatori. Queste tecnologie dovrebbero favorire la creazione di opportune piattaforme per: - creare mercati per le materie prime secondarie (riciclati) (sulla base di norme, appalti pubblici, ecc.) e facilitare il raggruppamento delle attività perché si realizzino delle situazioni di(simbiosi industriale; - sviluppare il mercato dei servizi garantendo l'accesso alle risorse richieste per attuarli, ed incoraggiare una scelta più ampia e migliore per i consumatori attraverso l'affitto, il prestito o la condivisione servizi in alternativa alla proprietà dei prodotti, salvaguardando al tempo stesso gli interessi degli utenti (in termini di costi, protezione, informazioni, condizioni contrattuali, aspetti assicurativi, ecc. - mantenere traccia dello stato delle risorse in circolazione e provvederne l'instradamento ai luoghi per la loro riqualificazione (manutenzione/riparazione servizi, ecc.);

ASPETTI QUALIFICANTI	RILEVANZA PER L'ECONOMIA CIRCOLARE
Adeguamento delle componenti di logistica, necessarie per supportare e garantire il corretto funzionamento del sistema produttivo; in particolare di ridurre i tempi di produzione e di consegna in relazione alle richieste dei clienti, richiede che l'orizzonte di miglioramento si estenda anche al di fuori dei confini della fabbrica, coinvolgendo direttamente il sistema di interazioni con fornitori e distributori	Obiettivi congruenti con quelli della economia circolare.
Strutturazione che miri a migliorare la qualità del prodotto, i tassi di produzione, il tempo di attraversamento e la flessibilità dei sistemi di produzione, riducendo però al contempo energia, materiali utilizzati, scarti e prodotti inquinanti.	Obiettivi congruenti con quelli della economia circolare spostando il fuoco dal prodotto al servizio
Capacità di creare una rete di fornitura sostenibile (sia economicamente che dal punto di vista energetico/ambientale) che sia in grado di ristrutturare velocemente e dinamicamente i collegamenti all'interno dell'insieme di unita produttive e distributive, distribuite geograficamente ma elettronicamente collegate, in una sorta di fabbrica virtuale estesa	Obiettivi congruenti con quelli della economia circolare.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Oggi l'integrazione fra gli attori della filiera è spesso poco strutturata e non supportata da tecnologie ICT appropriate: molte interazioni avvengono tramite la fornitura diretta di prodotti, semilavorati, componenti, materiali e tecnologie fra gli attori della filiera, motivo per cui l'integrazione avviene di fatto fisicamente in fase di produzione, rendendo quindi spesso inevitabili rivisitazioni successive di prodotti e fornitori, che aumentano il time to market e quindi riducono la competitività della filiera. I sistemi di pianificazione complessi, in grado di intervenire in tempo reale sul processo produttivo e sulla logistica dello stesso, differiscono in modo sostanziale da quelli classici, in quanto presentano la necessità di doversi adattare a vari livelli alla variabilità delle condizioni al contorno in cui si trovano ad operare. Nella pratica attuale il sistema di adattamento della pianificazione, laddove presente, è basato su un insieme di modi operazionali predefiniti, che possono essere attivati, più o meno automaticamente, in base alle esigenze. L'introduzione di strumenti software in grado di gestire autonomamente anche solo un parte di queste situazioni permetterebbe un salto generazionale nel livello di reattività della produzione alle richieste del mercato. Di pari importanza rispetto alla componente algoritmica, un elemento chiave per permettere la coordinazione inter-fabbrica è un'adeguata rete di comunicazione fra gli attori della filiera chiamati a far collaborare le loro strategie dinamiche. Al momento attuale, al di fuori di grossi gruppi industriali, formati da più compagnie differenti ma collegati da una comune infrastruttura IT, le interazioni fra fornitori, produttori, distributori e clienti si basano su semplici tecniche e soluzioni di standardizzazione delle interfacce. La sfida in questa direzione è quella di integrare fra loro tecnologie di pianificazione dinamica con soluzioni di condivisione remota di informazioni, abilitando la costituzione di una sorta di sistema multi-agente distribuito che permetta il coordinamento di moduli operativi separati fisicamente ed eterogenei.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

40 milioni di euro

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 5

COMPONENTI E SOTTOSISTEMI PER IL MIGLIORAMENTO DELL'EFFICACIA, DELL'EFFICIENZA E DELLA SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE

Le nuove soluzioni di dispositivi meccatronici saranno costituite da materiali innovativi performanti e funzioni elettroniche evolute mediante l'utilizzo di micro-processori, controllori embedded, FPGA riconfigurabili, processori stampati su film sottili. Le architetture ICT dovranno integrare una nuova generazione di sensori ed attuatori multifunzionali (per esempio soluzioni ibride di sensori per la visione ed il contatto, sensor fusion, smart sensors) e logiche di ottimizzazione innovative come le logiche di monitoraggio e di harvesting energetico integrate con il controllo del processo. Sia le soluzioni meccatroniche che i sensori dovranno inoltre essere in grado di svolgere task complessi sulla base dell'elaborazione di dati complessi dal campo unite ad attività di diagnostica avanzata ed meccanismi di auto-apprendimento lungo il ciclo di vita delle risorse operanti nei sistemi produttivi.

Pertanto, lo sviluppo di nuove soluzioni di dispositivi richiede attività di ricerca e sviluppo multidisciplinari legati alla considerazione congiunta di variabili fisiche (meccaniche, elettriche, idrauliche, pneumatiche) e chimiche (emissioni processi, parametri biologici). Nondimeno la conoscenza derivante dallo studio nei diversi ambiti disciplinari dovrà essere completata dalla capacità di implementare algoritmi e logiche di analisi altamente affidabili tali da generare modelli alla base dei futuri sistemi di controllo intelligenti.

La nuova generazione di macchine e sistemi di produzione eco-sostenibili dovrà rispondere a forti vincoli riguardanti i bassi consumi e impatti ambientali come fattori chiave per mantenere la competitività sul mercato globale. I nuovi sistemi di produzione dovranno essere progettati, sviluppati, configurati e gestiti ottimizzando sui diversi livelli non solo aspetti riguardanti prestazioni e produttività ma anche funzioni obbiettivo specifiche di massimizzazione di efficienza energetica e minimizzazione di impatto. Per poter raggiungere questi obiettivi e realizzare fabbriche altamente efficienti, l'energia dovrà in prima istanza poter essere misurata localmente in tempo reale, e le attività di controllo dei processi manifatturieri dovranno tenere conto del consumo energetico complessivo di ogni processo, ottimizzandolo globalmente e localmente. Maggiore attenzione dovrà essere posta nella progettazione e nella gestione dei processi manifatturieri e sarà sempre più necessario porre attenzione allo sviluppo di strumenti ed algoritmi che permettano di tener conto dell'efficienza energetica e della riduzione di impatto come parametri significativi ad ogni livello, identificando quali strategie conducono alle migliori performance energetiche oltre agli altri risultati di processo desiderati.

In questo contesto, nuove tecnologie e approcci innovativi alla progettazione dovranno essere introdotti sia livello macchina che a livello di sistema. In particolare per quanto riguarda il livello

macchina fattore determinante sarà lo sviluppo di strutture leggere realizzate con materiali altamente performanti che permetteranno di ridurre drasticamente i consumi di energia mantenendo elevate prestazioni e massimi livelli di qualità. Elevata attenzione sempre a livello macchina dovrà essere ulteriormente posta allo sviluppo di approcci orientati alla riduzione di utilizzo di sistemi ausiliari quali aria compressa, sistemi di raffreddamento e lubrificazione. Tale obiettivo dovrà essere conseguito attraverso lo sviluppo di tecnologie e metodologie innovative riguardanti i singoli processi di produzione che dovranno mantenere elevati standard di qualità e, al contempo, raggiungere gli obiettivi specifici appena citati.

A livello di sistema una nuova e differente possibilità di ridurre i consumi di energia di un impianto dovrà essere offerta dallo sviluppo di moderni strumenti informatici per agire direttamente nella fase di ingegnerizzazione. Nuove generazioni di tool per la progettazione dovranno contenere in modo dettagliato tutte le informazioni sul futuro impianto, il suo layout, le dimensione, informazioni su macchine e linee permettendo di verificare il comportamento dell'impianto durante la fase di engineering, in questo modo i processi potranno essere ottimizzati durante la progettazione piuttosto che nella fase di commissioning, tenendo conto non solo dei normali criteri di performance e capacità, ma anche del consumo complessivo di energia dell'impianto e di impatto ambientale del sistema complessivo, permettendo quindi di scegliere, fin dalle prime fasi di progettazione, le soluzioni in grado di offrire i processi con la massima efficienza energetica.

Infine, nell'ottica di realizzare una fabbrica sempre più efficiente dovranno essere sviluppati e integrati ad ogni livello nuove ed esistenti tecnologie di "energy harvesting" volti all'utilizzo dell'energia comunemente disponibile e dispersa nell'ambiente come fonte di generazione di energia a costo zero.

Il miglioramento delle prestazioni ambientali secondo i principi della produzione pulita ed efficiente (cleaner and efficient production) richiede modifiche ai diversi livelli di operatività di impresa. Tali ambiti vanno dalla gestione della produzione (tecnologie di processo sostenibili), a sistemi di innovazione organizzativa intra/extra impresa (EMAS, ISO, Supply chain management) fino all'innovazione di prodotto e servizio (eco-design, nuovi servizi ambientali, sistemi di consumo e produzione innovativi).

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Il concetto di Smart Factory oggi sempre più richiesto, non necessita di riprogettare una nuova fabbrica, ma piuttosto di dotarla di "intelligenza" tramite un set di nuovi sensori e attuatori e una elaborazione "smart" delle informazioni che agisce a livello gerarchico superiore in modo tale da consentire un tangibile incremento del livello di automazione della fabbrica, portando miglioramenti in termini di precisioni conseguite, di efficienza, di flessibilità e conseguente riduzione di costi.

In questo ambito i sensori e componenti meccatronica avanzati, fra cui in particolare i "sensori senza contatto" possono essere agevolmente impiegati nello sviluppo di sistemi di controllo intelligente operanti a livello gerarchico superiore, appaiono essere uno degli strumenti che nel prossimo futuro possano portare considerevoli vantaggi nell'ambito delle fabbriche del futuro.

Di fatto l'obiettivo di raggiungere elevate prestazioni per i sistemi produttivi si soddisfa mediante

una serie di molteplici azioni che vanno dalla progettazione di nuove macchine all'implementazione di tecnologie e processi fortemente innovativi. Tali aspetti tuttavia sono strettamente dipendenti dalla progettazione di moduli meccatronici e soluzioni di sensori di ultima generazione. Tali dispositivi hanno il potenziale di contribuire profondamente all'incremento di produttività, da un lato aumentando l'automazione di fabbrica e dall'altro minimizzando ed identificando eventuali inefficienze. Ciò contribuirebbe al raggiungimento di livelli di affidabilità dei sistemi che sfiorano il comportamento ideale, abbattendo drasticamente ogni rischio di guasto e comportamenti anomali delle risorse operanti nello shop-floor, in accordo con le strategie manifatturiere comunitarie che puntano a "fabbriche con zero-difetti".

I vantaggi derivanti dalla realizzazione di sistemi eco-sostenibili ottimizzando consumi energetici e impatti ambientali sono assolutamente indiscutibili: si osservi, infatti, che, soprattutto per i grandi consumatori di energia, anche un minimo miglioramento dei consumi specifici si traduce immediatamente in una cospicua riduzione dei costi di gestione e in un sensibile miglioramento degli impatti ambientali associati all'utilizzo della stessa energia.

Le motivazioni che conducono alla decisione di ottimizzare i consumi energetici e gli impatti ambientali adottando soluzioni tecnologiche innovative sono di conseguenza molteplici e portano a vantaggi competitivi non trascurabili. Innanzitutto la possibilità di migliorare le proprie prestazioni energetiche permette di ridurre i costi di gestione attraverso la definizione di specifici obiettivi e programmi di miglioramento energetici. Si può far fronte all'esigenza di regolamentare le attività aziendali che possono avere influenza sulle prestazioni energetiche dell'organizzazione affinché possano essere tenuti sotto controllo tutti i fattori di impatto energetico esistenti in azienda.

Non di poco significato è da considerare inoltre il vantaggio di disporre di una adeguata metodologia di controllo e monitoraggio delle proprie prestazioni energetiche. Questo anche nell'ottica di sfruttare opportunità derivanti dal fermento normativo degli ultimi anni in tema di performance energetiche e di impatto dei sistemi di produzione ottenendo in tal modo riconoscimento ufficiale della validità dei propri impegni e strategie in questi ambiti attraverso una certificazione da parte di un'organizzazione terza.

L'applicazione delle tecnologie ICT all'ambito dell'eco-sostenibilità deriva da tre precise necessità. In primo luogo l'applicazione delle soluzioni end-of-pipe rispetto a quelle di controllo e design preventivo si è rivelata nel tempo meno efficace da un punto di vista ambientale e più costosa. Le soluzioni di controllo e design preventivo richiedono invece sistema di monitoraggio, di simulazione e di interpretazione avanzato. In secondo luogo la pratica della cleaner production, pur rimanendo all'interno dei confini organizzativi della singola azienda, implica un approccio di tipo olistico per cui la performance viene definita anche in relazione a parametri esterni all'azienda. In particolare l'eco-innovazione può ritenersi efficace solo se è possibile dimostrarne i benefici ambientali durante tutto il ciclo di vita e condividerne i risultati. Tale framework è indispensabile ad esempio nella selezione della Best Available Technology (BAT) da applicare in uno specifico ambito industriale. Infine si assistito a uno negli ultimi anni a uno spostamento dell'applicazione delle soluzioni eco-efficienti dalle industrie di processo (siderurgia, chimica, cemento, carta ecc) ad ambiti manifatturieri diversi come quello dei beni di consumo. Tali settori pur avendo un impatto diretto più contenuto possono implicare un impatto indiretto (implicazioni su altri settori) significativo.

La complessità di questi settori pone barriere specifiche, alcune di queste sono la variabilità dei cicli produttivi, la crescita della complessità dei prodotti tradizionali (materiali nuovi, integrazione di componenti elettronici ecc.), la esternalizzazione crescente delle attività di impresa, la globalizzazione della filiera produttiva e la segmentazione crescente della richiesta di prodotti (individualizzazione dei beni e servizi). La semplice applicazione di criteri di ottimizzazione locale non accompagnata da strategie di insieme può essere dunque inefficiente se commisurata alla mancanza di informazioni che riguarda il ciclo di vita dei prodotti e la gestione dei cicli di produzione molto diversificati.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Le recenti attività di ricerca e sviluppo nell'ambito della progettazione di dispositivi di nuova generazione come moduli meccatronici e sensori sono orientate al raggiungimento di soluzioni efficienti e con un ridotto impatto economico ed ambientale. Ciò comporta da un lato lo studio di materiali innovativi per la progettazione di tali dispositivi con il fine di incrementare le funzionalità e garantire requisiti di leggerezza, ergonomia e sostenibilità. Gli aspetti più puramente meccanici e tecnologici sono corredati dalla ricerca di soluzioni evolute nel campo dell'elettronica. Ne sono esempio i moduli meccanici in materiali non convenzionali la cui leggerezza richiede lo sviluppo di apposite logiche di adaptronica per compensare le sollecitazioni dinamiche, costituendo quindi soluzioni meccatroniche complesse. Un ultimo aspetto riguarda l'impatto ambientale e l'efficienza energetica dei sistemi produttivi, in particolare per applicazioni nel campo dell'industria di processo, per il quale esiste un notevole bacino di attività di ricerca e prime applicazioni industriali che prevedono l'integrazione nei dispositivi complessi di nuove logiche di controllo, diagnostica e compensazione dei consumi.

La realizzazione di moduli meccatronici e sensori di nuova generazione comporta inoltre una serie di sfide ulteriori correlate alla progettazione. Un esempio è l'addensamento di un maggior numero di componenti elettronici ed involucri che li contengono necessari per aumentare le funzionalità e l'intuitività di tali dispositivi e di conseguenza soluzioni innovative per risolvere i problemi di riscaldamento ed i guasti, richiedendo quindi interoperabilità tra applicazioni di CAD elettronico (ECAD) e CAD meccanico (MCAD). Un ulteriore esempio riguarda la necessità di dover sostituire o potenziare l'hardware con software e firmware per garantire una crescente complessità e funzionalità dei dispositivi. Ciò comporta notevoli criticità legate alla necessità di includere importanti funzionalità nelle ultime fasi di produzione come caratteristiche del software embedded. Un terzo aspetto di rilievo riguarda l'impatto ambientale di tali dispositivi e la loro sostenibilità nelle fasi terminali del loro ciclo di vita.

Fino ad ora, la maggior parte delle industrie e dei sistemi di produzione sia in Italia che all'estero sono state progettate e costruite tenendo conto dei costi come più importante fattore economico e parametro su cui operare ogni decisione a livello di progettazione che di gestione. Questo approccio è stato naturalmente applicato a livello delle macchine, dei sistemi e delle infrastrutture. Tuttavia, a causa dei continui cambiamenti nei rispettivi settori, l'efficienza energetica e l'impatto ambientale dovrebbero diventare un altro fattore chiave nell'ottimizzazione ad ogni livello delle industrie del futuro. Attualmente esistono sul mercato soluzioni software e hardware che permet-

tono di eseguire monitoraggio e diagnostica dei parametri di consumo energetico e, in qualche caso anche di impatto ambientale. Benché sia, ad oggi, ampiamente riconosciuta la necessità di realizzare e sviluppare nuove configurazioni di macchina e sistema eco-sostenibili non esistono soluzioni che implementino strategie attive di riduzione dei consumi e ottimizzazione multilivello. Questo non permette di sfruttare la opportunità di aumentare la propria competitività e immagine rispettivamente attraverso la possibilità di tagliare efficacemente i costi di gestione e di ridurre drasticamente le proprie emissioni in ambiente.

A livello europeo il settore manifatturiero ha la più alta quota di imprese che applicano nuovi processi produttivi orientati a razionalizzare l'uso di materiali. Per circa il 60% delle piccole e medie imprese europee del settore manifatturiero il costo dei materiali rappresenta infatti almeno il 30% dei costi totali e per circa il 27% delle aziende il costo dei materiali supera il 50% del totale. Le strategie più frequentemente attuate dalle aziende manifatturiere per ridurre il costo dei materiali riguardano l'acquisto e/o lo sviluppo di tecnologie più efficienti seguite dall'introduzione di metodi più efficaci di riciclo, dal miglioramento della gestione dei flussi di materiali e dalla sostituzione dei materiali. Miglioramenti tradizionali possono variare tra il 5% e il 19%. Il miglioramento della produttività materiale, oltre a rappresentare un'opportunità per le aziende per ridurre i costi con conseguente miglioramento della competitività, si traduce anche in una minore pressione ambientale (ridurre l'utilizzo delle risorse significa anche ridurre gli impatti ambientali negativi associati all'uso di tali risorse). Dal punto di vista energetico le principali innovazioni hanno riguardato prevalentemente le industrie di processo (ad esempio forni elettrici di ultima generazione per l'industria dell'acciaio). Analogamente dal punto di vista della gestione e recupero dei materiali ausiliari e degli scarti molte innovazioni sono state compiute nei settori dell'industria di processo (ad esempio con sistemi di recupero enzimatico per l'industria cartiaria, l'utilizzo di solventi di carattere vegetale nei procedimenti di concia, la minimizzazione dei rifiuti nei processi chimici, nell'industria chimica ecc.). Infine la sostituzione dei materiali di processo primari vede i più importanti progressi ancora nell'industria chimica (utilizzo di materie prime rinnovabili per la produzione di prodotti chimici e materiali). In ambito strettamente manifatturiero si sono sviluppati sistemi di controllo, simulazione e ottimizzazione dei consumi di impresa e di controllo in remoto. Come accennato in precedenza tali tool sono prevalentemente rivolti alla simulazione e al controllo dei consumi energetici. Mentre vi è una diffusa presenza di soluzioni di ottimizzazione dei consumi di processo, legata anche a sistemi ICT di controllo, manca ancora un collegamento sistematico con gli strumenti di monitoraggio e simulazione ambientale, in particolar modo mancano approcci più ampi per attestare la performance dinamica a livello di intera linea o fabbrica. Tale tipo di evoluzione rappresenta la frontiera di sviluppo per gli strumenti di questo tipo (IEA 2007). L'integrazione tra i sistemi ERP e la stima dei consumi risulta limitata a poche analisi statiche o dedicata a macchine specifiche. In particolare mancano strumenti che possano collegare in tempo reale il monitoraggio di processo con variabili ambientali esterne (materiali di processo utilizzati, scarti prodotti ecc.) e standard settoriali per l'individuazione di valori di riferimento.

Ad oggi esistono una serie di tecnologie innovative che consentono una riduzione del consumo di lubrificanti: i processi MQL (minimum quantity lubricant) e processi Total Dry (che a dispetto della parola necessitano, comunque, di un quantitativo, seppur minimo, di lubrificante).

Questi processi, tuttavia, non sono adatti per tutte le lavorazioni: ad esempio l'alluminio, producendo un truciolo "pastoso" non è adatto alla lavorazione con questi processi.
Queste tecnologie sono già state impiegate all'estero e poco alla volta si stanno diffondendo in Italia. L'evoluzione di queste tecnologie, resa possibile anche dall'adozione di nuovi tipi di utensili con caratteristiche (sia per materiali impiegati, sia per concetti di lavorazione) tali da poter impiegare lavorazioni "a secco" o con un impiego trascurabile di risorse rispetto all'attuale. La riduzione dei consumi energetici e delle materie prime nelle applicazioni industriali è possibile anche mediante un approccio olistico che consideri tutti i campi di azione, pianificazione e controllo. Esistono sistemi di gestione che consentono un controllo ottimale in ciclo chiuso dei processi. L'evoluzione di queste soluzioni mediante sistemi di controllo adattativo (basati sulla messa a punto del sistema in configurazione ottimale, fotografando il processo in tali condizioni) permettono di correggere i parametri di processo per riportare la lavorazione nelle condizioni ottimali, insieme all'impiego di soluzioni tecnologiche a minimo impatto ambientale.
Dal punto di vista delle architetture, il concetto "tradizionale" di centro di lavorazione specializzato, ad assi, potrebbe essere sostituito in un prossimo futuro da delle isole di lavorazione multifunzionali, con la possibilità di avere sistemi con cambio utensile che possano eseguire operazioni diverse in un'unica isola di lavoro. Le tecnologie abilitanti per questa trasformazione consistono nello sviluppo di architetture a cinematiche parallele con isole di lavoro appositamente allestite con sistemi di cambio utensile e programmabili all'occorrenza mediante CAM funzionali senza dover modificarne più le architetture. A partire dai primi sistemi Tricept, le nuove soluzioni attualmente in sviluppo sono basate su sistemi robotizzati ad architetture parallele che ne superano i limiti (in termini principalmente di precisione di posizionamento e di forza di resistenza applicabile sugli snodi).
Un'isola funzionale dotata di queste nuove soluzioni architetturali insieme alle tecnologie atte alla minimizzazione dell'uso delle materie prime (sistemi MQL, Total Dry e nuovi materiali per gli utensili) abbinate a gestioni di tipo close loop con controllo adattativo garantiranno il massimo raggiungimento dell'efficienza di questi processi.
Per quanto concerne i processi di verniciatura, l'impiego di sistemi di ultra/filtrazione innovativi garantisce la possibilità di massimizzare il riutilizzo di acqua in modo da minimizzarne il consumo, insieme a sistemi più efficienti per il trasferimento della vernice sul pezzo con cabine di tipo a secco o innovativi sistemi di ricircolo condizionato per l'abbattimento del particolato.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

125 milioni di euro

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 6

NUOVI MACCHINARI, PROCESSI E MATERIALI PER LA MANIFATTURA DI PRODOTTI AVANZATI TRAMITE TECNICHE ADDITIVE

Le tecnologie additive riscuotono un crescente interesse nel mondo manifatturiero, affermandosi come uno dei temi più "sulla cresta dell'onda" sia a livello di opinione pubblica che per gli addetti ai lavori.

Bisogna innanzitutto definire cosa si intende per "tecnologie additive". A fronte di una certa confusione iniziale, è stata recentemente pubblicata una norma di validità mondiale, elaborata congiuntamente dagli enti normatori di vari Paesi. Secondo questo documento (denominato ISO/ASTM52921–1 "Standard Terminology for Additive Manufacturing-Coordinate Systems and Test Methodologies"), le tecnologie additive vanno intese come "quei processi che aggregano materiali al fine di creare oggetti partendo dai loro modelli matematici tridimensionali, solitamente per sovrapposizione di layer e procedendo in maniera opposta a quanto avviene nei processi sottrattivi (o ad asportazione di truciolo)". Come sinonimo di questo termine è spesso utilizzato quello di stampa 3D, molto popolare sui media e nel mondo dei maker e della personal manufacture condotta con macchine low-cost. Il comitato ASTM F42 identifica come "stampa 3D" quei processi additivi che realizzano prodotti tramite la deposizione di materiale mediante una testa di stampa, ugelli o altre tecnologie di stampa. Nel passato molte di queste applicazioni erano contraddistinte dalla definizione di "prototipazione rapida", ormai obsoleta dato che con le tecnologie additive vengono sempre più spesso realizzate parti funzionali e non solo pezzi prototipali/dimostrativi.

Queste definizioni vanno a delineare un quadro in cui le stesse tecnologie additive occupano un ruolo complementare a quello delle tradizionali macchine utensili per asportazione e deformazione o, più in generale, di una serie di beni strumentali correlati ai materiali/applicazioni elaborati.

In particolare, le tecnologie additive sono utilizzate per produrre modelli fisici, prototipi, componenti, attrezzature e prodotti di vario genere, realizzati in polimeri, metalli, ceramiche e materiali compositi, ma il ventaglio si sta rapidamente allargando a tessuti biologici e composti alimentari quali la pasta o il cioccolato. Questo avviene utilizzando, in linea di massima, sette famiglie di processi:

- estrusione - il materiale (solitamente polimero), portato allo stato pastoso, è distribuito selettivamente mediante un orifizio; questo processo è tipicamente usato nelle macchine low-cost per la stampa 3D;
- jetting - "goccioline" di materiale vengono spruzzate selettivamente per creare i layer di polimeri, cera o metalli;
- binder jetting - un agente legante allo stato liquido viene spruzzato su uno strato di polvere (polimerica, ceramica, terre da fonderia, eccetera);
- sheet lamination - il manufatto si crea mediante l'unione di fogli sagomati (solitamente di carta, ma anche metallici);

- fotopolimerizzazione - si basa sulla solidificazione selettiva di un polimero liquido mediante radiazioni elettromagnetiche (fornite da un laser o similare); in questa categoria rientra il noto processo di stereolitografia;
- power bed fusion - un flusso di energia opportunamente concentrato, fornito solitamente da laser o fasci di elettroni, va a fondere localmente uno strato di polvere (metallica o polimerica);
- direct energy deposition - un flusso di energia, fornito da un laser, fonde il materiale (tipicamente sotto forma di polvere metallica, convogliata nella zona di lavoro da un apposito erogatore) nel momento in cui esso viene depositato per costituire il pezzo.

Oltre alle tecnologie appena menzionate, direttamente impiegate nella produzione dei pezzi, vi sono altri aspetti fondamentali connessi con la manifattura additiva:

- *Tecniche di progettazione:* il processo di fabbricazione mediante processi additivi trae origine da un modello matematico 3D, teoricamente generabile da un qualsiasi CAD tridimensionale. Tuttavia:
  - la possibilità di generare parti con geometrie virtualmente slegate dai vincoli di "design for manufacturing" consente di generare feature geometriche "atipiche" per i software tradizionali come, ad esempio, strutture trabecolari, foam-like, a nido d'ape, eccetera, che né la progettazione tradizionale né la maggior parte degli strumenti di modellazione sono in grado di gestire efficientemente. Tuttavia, iniziano ad essere disponibili strumenti software che, da un lato, permettono di gestire queste problematiche e, dall'altro, di governare le fasi di progettazione integrando la definizione delle geometrie con la simulazione;
  - si manifesta la necessità di definire linguaggi di descrizione dei modelli che vadano oltre il formato STL (STereo Lithography interface format oppure Standard Triangulation Language) ereditato dalla prototipazione rapida, ma poco adatto a descrivere gli attuali modelli ad elevata complessità e poco integrato con i CAD moderni;
  - vanno rivisti i tradizionali approcci progettuali, al fine di sfruttare i gradi di libertà offerti dalla nuova tecnologia;
- *Post-processing:* le parti metalliche realizzate mediante tecnologie hanno livelli di finitura e tolleranze geometriche e dimensionali comparabili con quelli ottenibili mediante le tecniche di fonderia tradizionale. Questo richiede una rilavorazione alle macchine utensili che deve essere svolta considerando, da un lato, le caratteristiche dei materiali lavorati (spesso di difficile truciolabilità) e, dall'altro, le geometrie non convenzionali permesse dalle tecnologie additive. Inoltre, in alcune applicazioni è necessario svolgere post-trattamenti per migliorare le caratteristiche metallografiche e meccaniche del manufatto;
- *Caratterizzazione dei processi:* necessaria sia per attività "in-process" che garantiscano una costanza qualitativa dei manufatti generati (specie quando questi andranno a svolgere compiti "mission critical" come nel racing, nell'aerospaziale o nel biomedicale) sia per caratterizzare i materiali entranti ed uscenti dal processo;
- *Generazione delle materie prime:* il costo, la disponibilità e le qualità possono influenzare le performance tecnologiche ed economiche dei processi.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Il settore delle tecnologie additive è un settore in rapidissima evoluzione: diventa quindi estremamente difficile definire uno stato dell'arte consolidato, contrariamente a quanto può essere fatto negli altri settori del manifatturiero.

L'unico aspetto in cui si può rilevare una certa "stabilità" è quello dei processi "base" impiegati dal settore delle tecnologie additive (i sette visti in precedenza).

Al contrario, si possono rilevare variazioni pressoché quotidiane per quanto riguarda:

- applicazioni, sia a livello di settore industriale di sbocco che di applicazione a prodotti esistenti (per svolgerne, ad esempio la mass customization) o creati ex-novo sfruttando le possibilità di design "illimitato" derivanti dalle tecnologie in oggetto;
- materiali lavorati, sia a livello di natura chimico fisica (nuovi materiali da elaborare) sia a livello morfologico (combinazione, nello stesso manufatto, di materiali diversi per densità, colore, ecc.);
- modelli di business che passano:
  - per la produzione di macchinari tramite crowd funding, utilizzato da un range di aziende che va dalle start up, che intendono lanciare nuovi prodotti, fino a multinazionali con fatturati di milioni di euro/anno;
  - per gli aspetti di utilizzo che vanno dall'uso privato/hobbistico (nel cosiddetto ambito dei maker o "artigiani digitali" che utilizzano normalmente software open-source e macchine low cost) a centri di servizio o aziende di produzione che integrano le tecnologie additive nella loro catena di generazione del valore, al fine di migliorarne le performance;
  - per le applicazioni anche qui estremamente varie e che spaziano dalla costruzione di oggetti per uso privato/ludico ad applicazioni ad altissima sofisticazione, come quelle necessarie per le applicazioni spaziali o racing dove diviene fondamentale la combinazione tra leggerezza e prestazione meccanica, a sua volta fortemente favorita dai minori vincoli progettuali in termini geometrici offerti.

Focalizzandosi sul panorama italiano, esso poco si discosta dalla media degli altri paesi industrializzati, data la relativa novità di queste tecnologie. Possiamo tuttavia individuare alcuni aspetti peculiari:

- a livello di produzione di macchinari, dove a fronte di una buona vivacità nelle fasce di mercato "low-end" (tipicamente legata alla stampa 3D) e "mid-end" (macchine di maggior sofisticazione operanti con polimeri) si riscontra una minore presenza nel settore del metallo (focalizzato in prevalenza verso le applicazioni del dentario e della gioielleria) rispetto a paesi come Germania e USA, in cui sono localizzati la maggioranza dei player principali del settore macchine per metalli;
- nell'ambito dei centri di servizio, ben presenti nelle principali aree manifatturiere e in grado di svolgere attività di progettazione e realizzazione sia di prototipi che di manufatti;
- a livello commerciale, dove filiali di produttori esteri e aziende commerciali forniscono una vastissima gamma di prodotti e soluzioni per l'impiego industriale delle tecnologie additive;
- per quanto riguarda la produzione, i settori preminenti nell'ambito manifatturiero risultano

essere quello della protesica (dove le tecnologie additive sono impiegate da aziende di primaria importanza su scala mondiale), il racing e l'aerospaziale.

Va infine notato che una massiccia adozione delle tecnologie additive andrebbe ben a sposarsi con le caratteristiche di flessibilità e customizzazione che caratterizzano le aziende manifatturiere (spesso PMI) italiane, a patto che si vada a creare l'opportuno tessuto culturale e di conoscenza.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Le capacità "near net shape" delle tecnologie additive non sono che la punta dell'iceberg dei motivi che le stanno rendendo sempre più interessanti per il manifatturiero meccanico.
In realtà, vi sono anche altri motivi riconducibili a tematiche di natura gestionale: la richiesta di prodotti "green", la mass customization e la "servitizzazione" (ossia la trasformazione del prodotto in servizio) sono tra i driver che richiedono di pensare, progettare e costruire in maniera diversa i prodotti. Questi, in particolare, devono diventare:

- più leggeri, per ottenere maggior efficienza energetica, richiedendo, per contro, l'impiego di materiali più sofisticati di quelli utilizzati precedentemente (per esempio acciai speciali, titanio, compositi, ceramiche, materiali ibridi);
- smart, integrando nuove funzioni grazie alle tecnologie informatiche che consentono di acquisire dati che ne migliorano le performance (in particolare ergonomiche ed energetiche) e l'integrazione, specie nell'ottica della servitizzazione.

Per ottenere questi obiettivi, il manifatturiero meccanico deve allontanarsi da alcuni suoi paradigmi tradizionali, per dar vita a quello che viene definito "advanced manufacturing". Questo concetto, in particolare, vede la "fusione" delle tecnologie di lavorazione (e delle relative macchine) con le tecnologie informatiche usate per effettuare, in maniera integrata, la progettazione, la simulazione dei prodotti, dei processi e dei sistemi di produzione, nonché la conduzione, la gestione e il controllo di questi ultimi. Ciò al fine di adattare il più rapidamente e flessibilmente possibile il sistema manifatturiero a nuove esigenze produttive, a loro volta legate a nuove e, normalmente, più sofisticate richieste del mercato.
Se, da un lato, i produttori sono stati capaci di inserire nelle macchine utensili moderne le funzioni e le tecnologie necessarie per soddisfare numerosissime esigenze dell'advanced manufacturing, dall'altro sono emerse nuove necessità produttive che vanno affrontate con tecnologie nuove.
Tra queste nuove necessità emerge quella di slegarsi dalle classiche regole del "design for manufacturing", a loro volta collegate a doppio filo ai classici processi delle tecnologie meccaniche. Inoltre, le necessità di accorciare la catena produttiva per realizzare prototipi funzionali o, meglio, prodotti personalizzati in piccole o piccolissime serie (e/o di lavorare materiali inconsueti), contribuiscono alla domanda di nuovi processi produttivi. Con le tecnologie additive è anche possibile apportare sensibili cambiamenti alla sequenza produttiva del prodotto, in termini di

- riduzione di attrezzature ed eliminazioni di parte del ciclo produttivo, con impatto su flessibilità di processo e time to market;

- riduzione o eliminazione di fasi di assemblaggio, dando per esempio origine a parti complesse senza necessità di saldature o incollaggi, oppure a veri e propri cinematismi;
- possibilità di creare *feature* geometriche molto complesse e di difficile/impossibile creazione con altre tecnologie;
- possibilità di processare materiali di difficile lavorabilità (leghe per alta temperatura, compositi metalloceramici) o di natura "inconsueta" per il manifatturiero (materiali biologici "viventi" come cellule e tessuti);
- riduzione di scarti e sfridi di lavorazione;
- miglioramento di altri processi industriali, permettendo la realizzazione di attrezzature più efficienti (per esempio stampi conformant cooling).

Per ottenere questi risultati, però, è necessario agire su alcune leve di sviluppo a livello di:

macchine/processi

- dimensioni delle macchine, al fine di poter produrre parti di maggior dimensione. Attualmente le massime dimensioni lavorabili raramente superano il metro e, mediamente, si aggirano sui 200-300 mm, in funzione di macchina e processo;
- flessibilità a livello di materiali lavorati, sia per quanto riguarda le tipologie sia per i tempi di set-up macchine, al fine di realizzare prodotti di materiali diversi con meno tempi morti e/o realizzare elementi multi-materiale;
- controllo di processo, specie per la produzione di parti non prototipali da impiegare in applicazioni ad alte prestazioni (aerospace, racing, biomedicale) e per garantire la qualità e la costanza delle lavorazioni;
- integrazione con altri processi produttivi a livello di macchina (p.e. macchine ibride) e di sistema (p.e. catene produttive che integrano i processi additivi a livello di produzione "mass-customizzata");

materiali

- aumentandone la disponibilità per diminuirne i costi e favorire la competitività delle nuove soluzioni basate sulle tecnologie additive. Va inoltre considerata l'opportunità competitiva per il nostro Paese, legata all'aumento dei produttori di materie prime, attualmente molto rari sul suolo nazionale;
- relativamente alle metodologie di produzione, specie per le polveri metalliche, con processi più efficienti (a livello di produttività e resa energetica) rispetto agli attuali e in grado di garantire qualità e prestazioni;
- per le tipologie di materiali lavorabili, estendendo la gamma sia di quelli già manipolabili con le tecnologie additive (metalli, polimeri, compositi, ceramiche) sia di quelli "in prospettiva" (generi commestibili, elementi biologici);

prodotto

- ripensando prodotti già esistenti sul mercato in funzione della realizzabilità con processi additivi, al fine di alleggerirli, aumentarne le prestazioni, renderli più sostenibili, realizzarli con materiali o geometrie nuove e ottimizzate, sia per performance che per design (aspetto molto utile per quanto riguarda il legame con il "made in Italy e le sue implicazioni industriali);

- realizzando nuove generazioni di prodotto che si basano sulle caratteristiche di "free forming" e di "near net shape" (nonché sulla possibilità di lavorare materiali difficili o inconsueti);
- realizzando prodotti ibridi che integrano parti "in additivo" con altre costruite con tecnologie differenti/materiali diversi; questo al fine di economizzarne o velocizzarne la produzione o per portare all'integrazione di funzioni nel prodotto (per esempio sensoristica o altre funzioni di natura ICT, energy harvesting, caratteristiche estetiche personalizzate);

gestionale

- sfruttando le potenzialità a livello di mass customization e di personalizzazione;
- per creare nuovi modelli di business per le PMI italiane, grazie alla servitizzazione (passando, per esempio, da subfornitori a centri di servizio che integrano produzione, progettazione e design);
- dando vita a nuove tipologie di microaziende diffuse sul territorio, grazie ad una evoluzione in ottica economica del concetto di maker e personal manufacturing;
- creando autoimpiego con lo sfruttamento per esempio, dell'integrazione in rete permessa dalla possibilità di "disgiungere" geograficamente la fase progettuale dalla produzione fisica (inviando i file descriventi il progetto finito via internet e ricevendo il prodotto finito);
- creando nuovi modelli di sicurezza informatica e tutela della proprietà intellettuale che preservino dalle contraffazioni .

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE:

50 Milioni di Euro

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 7

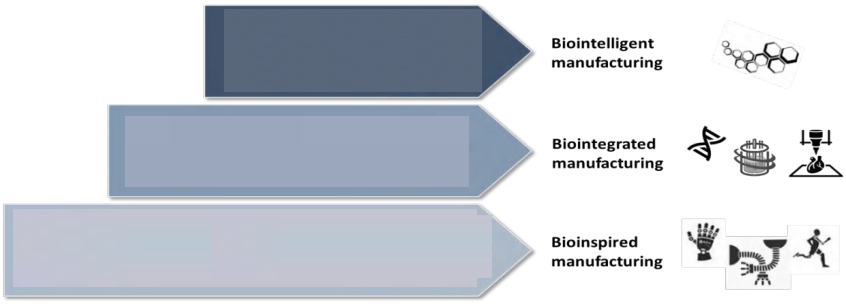
TRASFORMAZIONE BIOLOGICA NELL'INDUSTRIA MANIFATTURIERA

La Trasformazione Biologica nell'Industria Manifatturiera (TBIM) consiste nell'impiego e integrazione di concetti, funzioni, materiali e strutture di tipo biologico e/o bio-ispirato per lo sviluppo di tecnologie e sistemi manifatturieri intelligenti e sostenibili con l'obiettivo di realizzarne la piena potenzialità.

La TBIM si realizza attraverso processi di utilizzazione crescente di principi, materiali, processi e risorse della natura biologica nelle tecnologie e nei sistemi manifatturieri allo scopo di creare valore aggiunto in maniera pienamente sostenibile.

In tale ottica, i sistemi manifatturieri del futuro saranno dotati di proprietà, caratteristiche, capacità e risorse che convergono verso quelle dei sistemi viventi servendosi di procedure di bio-ispirazione, bio-integrazione e bio-intelligenza.

La TBIM non si configura come un'ulteriore rivoluzione industriale ma piuttosto come una nuova frontiera nell'evoluzione della digitalizzazione e dell'Industria 4.0 (I4.0) che, sfruttando le tecnologie abilitanti offerte da ICT, IoT, Big Data, Digital Twin, ecc., trasformi profondamente l'industria manifatturiera come è oggi conosciuta, convergendo verso la sfera biologica e aprendo opportunità di mercato di straordinario interesse per le industrie impegnate nello sviluppo di tecnologie e sistemi manifatturieri intelligenti e sostenibili.



Sviluppo della TBIM: sistematica applicazione della conoscenza dei processi biologici allo scopo di realizzare tecnologie e sistemi manifatturieri intelligenti e sostenibili.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Nel lavoro "Biologicalisation: Biological Transformation in Manufacturing", pubblicato da G. Byrne et al. nel CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 21 (2018): 1-32, è stata proposta la seguente definizione di "Trasformazione Biologica nell'Industria Manifatturiera - TBIM":

L'impiego e l'integrazione di principi, materiali, funzioni, strutture e risorse di tipo biologico e bio-inspirato per lo sviluppo di tecnologie e sistemi manifatturieri intelligenti e sostenibili allo scopo di raggiungerne le piene potenzialità.
Partendo da tale definizione, nel lavoro si conclude che:
La TBIM effettivamente rappresenta una nuova frontiera per le tecnologie e i sistemi di produzione avanzati nell'era della digitalizzazione e I4.0, e le opportunità di innovazione e le potenzialità di mercato sono straordinariamente interessanti.
Per dare sostanza alle conclusioni di cui sopra, come lo stesso lavoro raccomanda, si rende necessaria l'adozione di un approccio pragmatico in grado di proporre chiari e specifici esempi di che cosa rappresenti la TBIM attraverso lo sviluppo e l'implementazione di attività di ricerca la cui funzione è di dimostrare l'efficacia di questo emergente cambiamento di paradigma nelle tecnologie e nei sistemi manifatturieri avanzati.
Gli obiettivi principali delle attività di ricerca, da sviluppare attraverso approfondimenti e valutazioni degli aspetti di bio-ispirazione, bio-integrazione e bio-intelligenza, sono:

- L'evidenziazione del ruolo della TBIM come nuova frontiera della digitalizzazione e I4.0, capace di portare a un radicale cambiamento di paradigma nell'industria manifatturiera.
- La dimostrazione del nuovo concetto emergente di "Sistemi Manifatturieri Viventi" ovvero di sistemi manifatturieri del futuro dotati di caratteristiche, proprietà e capacità che convergono verso quelle dei sistemi viventi.

Le attività di ricerca da sviluppare devono focalizzarsi su aree di significativo rilievo per l'ingegneria della produzione manifatturiera. Esse formeranno la base per la sperimentazione e l'analisi dei vari scenari e aspetti tecnologici di I4.0 nella prospettiva della nuova frontiera della TBIM.
Esempi degli attuali scenari relativi alla digitalizzazione e I4.0 sono:

- Decentralizzazione nella produzione manifatturiera.
- Nuove architetture di catene di fornitura e loro integrazione nella produzione manifatturiera.
- Spazio dei dati industriali - Sicurezza Cyber.
- Riduzione dei tempi di latenza.
- Livelli di automazione notevolmente incrementati.
- Apprendimento automatico (Machine Learning).
- Nuovi più elevati livelli di connettività.

In aggiunta a questi macro-sviluppi, alcuni esempi di sviluppi tecnologici che spingono verso livelli crescenti di bio-ispirazione, bio-integrazione e bio-intelligenza e che vanno oltre l'attuale quadro di I4.0, evidenziando aspetti rilevanti per la TBIM, sono:

- Nuova chimica e nuovi materiali.
- Nuove metodologie di progettazione per nuovi prodotti che impiegano nuovi biomateriali.
- Impatto sui processi manifatturieri di tipo tradizionale attraverso lo sviluppo di processi manifatturieri bio-ispirati e bio-integrati di tipologia completamente nuova.
- Potenziale per lo sviluppo di nuove risorse strumentali per l'industria manifatturiera, compresi i robot, le macchine utensili e i sistemi metrologici.

Gli aspetti emergenti di cui sopra potranno svilupparsi in modo particolarmente incisivo attraverso la fusione tra il mondo fisico, il mondo digitale e il mondo biologico. Nondimeno, il passaggio dagli attuali sistemi manifatturieri tradizionalmente "privi di vita" a nuovi sistemi manifatturieri caratterizzati da elementi tipici degli esseri viventi e della natura biologica (capacità cognitive, di comunicazione, di auto-riparazione, di auto-assemblaggio, di apprendimento) va dimostrato in maniera convincente ed esaustiva.

Al fine di porre le basi per un cambio di paradigma industriale nella prospettiva TBIM, con riferimento alla fusione tra il mondo fisico, il mondo digitale e il mondo biologico, un approccio di bio-integrazione e bio-intelligenza da approfondire, analizzare e dimostrare è rappresentato dallo sviluppo di nuovi fluidi lubrorefrigeranti sostenibili basati su microorganismi per processi di lavorazione meccanica a forte caratterizzazione "green".

Il punto di partenza è dato dalla costatazione che tali fluidi lubrorefrigeranti, comunemente detti fluidi da taglio, sono interamente a base di oli minerali oppure, nel caso di fluidi da taglio a base acqua, contengono percentuali significative di oli minerali (fino al 10%). Il consumo mondiale annuo di fluidi da taglio è pari a svariati miliardi di litri e questo dato rende particolarmente evidente la loro importanza per l'industria manifatturiera. Inoltre, l'esaurimento delle riserve di oli minerali sta già spingendo gli utilizzatori industriali di lavorazioni meccaniche che richiedono l'impiego di fluidi da taglio verso l'individuazione di nuove materie prime di tipo rinnovabile.

È opportuno segnalare che la colonizzazione dei fluidi da taglio a base acqua da parte di microorganismi rappresenta attualmente una seria difficoltà a causa del metabolismo dei componenti del fluido da taglio che può comportare problemi di sicurezza e di minaccia per la salute nell'ambiente di lavoro. Conseguentemente, nei settori dell'industria manifatturiera dove i fluidi da taglio sono comunemente impiegati, i microorganismi sono considerati dei "nemici" da distruggere tempestivamente e nel modo più assoluto.

L'approccio di TBIM proposto rappresenta quindi un radicale cambiamento di paradigma rispetto all'attuale atteggiamento "ostile" verso i microorganismi nei fluidi da taglio. Lo scopo è di sfruttare il potenziale di sostituzione dei fluidi da taglio convenzionali con fluidi da taglio contenenti microorganismi dotati di efficace funzione lubrificante per l'incremento della sostenibilità ambientale.

A tal fine sarà necessario sviluppare e applicare sistemi avanzati di monitoraggio intelligente basati su sensori e sistemi sensoriali smart, metodi di estrazione di caratteristiche di segnali sensoriali (feature extraction) e di riconoscimento di configurazioni (pattern recognition), intelligenza artificiale e apprendimento automatico (machine learning) per la presa di decisioni allo scopo di ottimizzare le nuove condizioni di processo determinate dai nuovi fluidi da taglio.

I settori dell'industria manifatturiera fortemente interessati a questo tipo di bio-innovazione sono: l'industria automobilistica, aerospaziale, delle macchine utensili, dei fluidi da taglio, della produzione di energia, e ogni altro settore industriale in cui le lavorazioni meccaniche per asportazione di materiale sono decisamente rilevanti.

Le evidenze attese dai risultati delle attività di ricerca sulla TBIM in questo ambito sono:

- Dimostrazione degli aspetti di bio-integrazione in termini di utilizzazione diretta di risorse di natura biologica per innovare le tecnologie manifatturiere nel quadro della TBIM.
- Motivazione per nuovi paradigmi di progettazione, ad es. nuove progettazioni di componenti

di macchine utensili per consentire l'impiego dei nuovi fluidi da taglio.
- Potenziamento delle procedure di monitoraggio intelligente e di machine learning per la presa di decisioni in automatico ai fini dell'ottimizzazione dei nuovi processi di lavorazione "green".
- Fabbrica intelligente del futuro caratterizzata da processi di lavorazione "green", con minimizzazione dell'impatto ecologico e massimizzazione dell'efficienza nell'impiego delle risorse. L'aspettativa è che soltanto i sistemi manifatturieri che incorporeranno la sostenibilità nel loro concetto di intelligenza saranno effettivamente competitivi nei tempi medi e lunghi.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Uno studio del 2012, realizzato dalla European Science Foundation in collaborazione con altre organizzazioni equivalenti quali la National Science Foundation statunitense, ha affrontato il tema del "Nature Inspired Design and Engineering for a Sustainable Future". In una delle relazioni di questo studio si riporta che: "Le grandi sfide del XXI secolo, quali il riscaldamento globale, la disponibilità di acqua potabile, la produzione sostenibile di alimenti e materiali, e il miglioramento della qualità della vita nelle società che in via di invecchiamento, richiedono un nuovo approccio alla scienza e alla tecnologia più strettamente collegata alla natura biologica. La progettazione bio-ispirata di prodotti di consumo offre soluzioni tecnologicamente nuove e sostenibili ai problemi della società che non possono essere fornite dagli approcci tradizionali in maniera altrettanto efficace ed economica. Una più profonda comprensione di come operano i sistemi biologici può portare a nuove intuizioni e approcci per la generazione, conversione, immagazzinamento, trasporto dell'energia. Può anche ispirare innovazioni nell'assistenza sanitaria e introdurre una nuova era di materiali con nuove proprietà straordinarie quali l'auto-riparazione".

Il progetto BIOTRAIN, finanziato dal BMBF (German Ministry of Education and Research), è un progetto pilota del 2017-2018 dedicato ad un'indagine approfondita sulla trasformazione biologica della catena di valore industriale. I sei istituti Fraunhofer partecipanti al progetto hanno lavorato in stretta collaborazione con gli sponsor e il comitato tecnico consultivo comprendenti rappresentanti di alto livello dei diversi settori industriali ed enti di ricerca pubblici e privati. Lo scopo del progetto era di analizzare la potenzialità e la domanda di trasformazione biologica dell'industria manifatturiera e sviluppare una strategia di ricerca nazionale con raccomandazioni per le autorità pubbliche. I principali risultati delle attività progettuali comprendono una definizione condivisa del concetto di trasformazione biologica dell'industria manifatturiera, lo status-quo del panorama industriale tedesco, i possibili scenari di sviluppo fino al 2050 e i principali argomenti di ricerca nel settore. La TBIM è stata vista come l'applicazione sistematica della conoscenza dei processi biologici al fine di ottimizzare i sistemi di produzione manifatturiera. Tre diverse modalità di sviluppo sono state identificate:

- Prima modalità: ispirazione di nuove tecnologie di processo a partire da fenomeni biologici, da realizzare attraverso l'approccio bio-mimetico. Importanti esempi sono le tecnologie di fabbricazione additiva, l'intelligenza di sciame (swarm intelligence), ecc.
- Seconda modalità: integrazione tra sistemi tecnologici e sistemi biologici. Ad es. impiego di filtri a base di alghe nei processi manifatturieri per filtrare le emissioni indesiderate a ciclo chiuso.

- Terza modalità: interazione tra sistemi tecnologici, sistemi biologici e sistemi ICT per la realizzazione di nuovi sistemi manifatturieri bio-intelligenti che porteranno a metodologie completamente nuove nella produzione industriale manifatturiera.

La sintesi delle conclusioni del progetto è riportata nei seguenti punti:

- La trasformazione biologica dell'industria manifatturiera è già iniziata.
- Si prevedono cambiamenti radicali nelle tecnologie e nei sistemi manifatturieri tradizionali.
- La trasformazione biologica è caratterizzata da notevoli potenzialità di sviluppo sostenibile.
- Sono già disponibili basi per impostare un programma complessivo di trasformazione biologica.
- La focalizzazione è sulla cooperazione interdisciplinare e non sulle singole tecnologie abilitanti.

Il gruppo di lavoro dell'International Academy for Production Engineering (CIRP), Parigi, Francia, denominato "Bioinspired Manufacturing Processes and Systems", ha operato nel triennio 2015-2017 affrontando alcuni degli aspetti chiave legati al TBIM. In una relazione intitolata "Bio-inspired functional surfaces for advanced applications" sono state passate in rassegna le superfici biologiche in grado di ispirare nuove applicazioni tecniche. I corrispondenti prodotti non biologici sono stati realizzati attraverso l'adozione, da parte della scienza e ingegneria della produzione, di architetture avanzate bio-ispirate capaci di conferire ai prodotti superfici funzionali con proprietà speciali. Nel corso di milioni di anni, gli organismi biologici sono stati continuamente in lotta con condizioni ambientali ostili e i più adatti tra loro sono sopravvissuti attraverso una progressiva evoluzione. In particolare, le superfici biologiche, che sono le interfacce attive tra gli organismi e l'ambiente, si sono evolute verso più elevati livelli di funzionalità intelligente. Queste superfici sono diventate particolarmente efficienti utilizzando una combinazione di materiali disponibili e di strategie specifiche di tipo fisico e chimico. Le strategie fisiche comprendono la configurazione di particolari strutturazioni superficiali mentre le strategie chimiche comprendono lo sviluppo di sistemi sensoriali e di attuatori. Tali strategie consentono di realizzare superfici funzionali con straordinarie proprietà di adesione, idrofobicità, riflessione multispettrale, acquisizione di energie alternative, regolazione termica, capacità anti-vegetativa, e altre funzioni avanzate.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

Le attività di ricerca prevedono la collaborazione tra partner accademici con competenze in lavorazioni meccaniche, fluidi da taglio basati su microorganismi, sensori e sistemi sensoriali smart, intelligenza artificiale e machine learning, e partner industriali del settore delle costruzione di macchine utensili, dello sviluppo di fluidi da taglio, utilizzatori di lavorazione meccaniche che impiegano fluidi da taglio si vasta scala. Risorse economiche necessarie: 20 milioni di euro.

SETTORE 9

>SPAZIO<

MEMBRI DEL GRUPPO DI LAVORO

Settore – Spazio

Coordinatore

THALES ALENIA SPACE ITALIA SpA	**Antonio Gammarota**

Componenti

THALES ALENIA SPACE Italia SpA	**Lucia Amorosi**
	Flaviano Bagaglini
	Ornella Bombaci
	Flavio Bandini
	Giorgio Boscheri
	Giuseppe Catastini
	Massimo Chiampi
	Cosimo Chiarelli
	Carlo Ciancarelli
	Salvatore Corvo
	Maurizio Costa
	Martina Giraudo
	Arturo Intelisano
	Piergiorgio Lanza
	Ilaria Locantore
	Francesco Lumaca
	Andrea Merlo
	Giorgio Musso
	Marco Nebiolo
	Mauro Pasquinelli
	Pasquale Pellegrino
	Stewart Pelle
	Mario Pessana
	Andrea Pietropaolo
	Alessandro Pisano
	Albino Quaranta
	Vincenzo Schena
	Andrea Torre
	Oreste Trematerra
	Roberto Venturini
	Eleonora Zeminiani

segue>>

CIRA	Stefania Cantoni
	Antonio Concilio
	Francesco Battista
	Felice De Nicola
	Ignazio Dimino
	Roberto Fauci
	Nunzia Favaloro
	Roberto Gardi
	Marco Marini
	Giuseppe Rufolo
	Angela Vozella
CNR	Michele Giordano
	Alfonso Martone
INSTM	Giovanni Pulci
AEROSPAZIO TECNOLOGIE Srl	Fabrizio Scortecci
AVIO SpA	Paolo Bellomi
LEONARDO SpA	Marco Molina
	Enrico Suetta
OHB Italia SpA	Lorenzo Cibin
PLANETEK Italia Srl	Cristoforo Abbattista
	Luigi Agrimano
	Leonardo Amoruso
	Vito Fortunato
SITAEL SpA	Giovanni Cesaretti
	Giovanna Orlando
	Vincenzo Stanzione
TELESPAZIO SpA	Paolo Bellofiore
	Pierpaolo Pilloni
	Damiano Valletta
POLITECNICO DI BARI	Vito Albino
	Lorenzo Ardito
	Angelo Natalicchio
	Antonio Messeni Petruzzelli
UNIVERSITÀ DI NAPOLI “FEDERICO II”	Daniele Riccio
UNIVERSITÀ DI PISA	Sergio Saponara
UNIVERSITÀ LA SAPIENZA di ROMA	Marcello Onofri
UNIVERSITÀ DI TOR VERGATA	Francesca Nanni

Con la collaborazione di:
ASI - AGENZIA SPAZIALE ITALIANA
SPIN-IT – PIATTAFORMA TECNOLOGICA SPAZIALE NAZIONALE

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 1

TECNOLOGIE PER MISSIONI GRAVIMETRICHE

La ***Gravimetria***, ovvero la misura del campo gravitazionale terrestre, alimenta un gran numero di applicazioni in vari settori quali, solo per citarne alcuni:

- Geodesia: dalla mappa del campo gravitazionale si ricava la forma del "geoide" terrestre, la superficie equipotenziale che meglio approssima la superficie degli oceani a riposo (cioè non sottoposti all'azione delle maree, delle correnti e degli eventi meteorologici) e che fornisce il riferimento per la misura delle altezze "sul livello del mare";
- Oceanografia: sottraendo dalla mappa altimetrica della superficie degli oceani l'altezza del geoide si ottiene la "topografia oceanica dinamica" da cui si ricava la mappa della circolazione oceanica (forma, direzione e velocità delle correnti);
- Geofisica della Terra solida: il campo gravitazionale fornisce informazioni sulla struttura interna della Terra (in particolare della litosfera e del mantello), permettendo, tra l'altro, di identificare le zone soggette a rischio sismico e di caratterizzare le varie fasi dei cicli sismici, come dimostrato dai recenti studi sulla "sismologia gravitazionale";
- Idrologia e Glaciologia: misurando come varia nel tempo il campo gravitazionale terrestre si possono monitorare i cicli idrologici nei bacini fluviali, l'aumento o la diminuzione dell'acqua presente nel sottosuolo, la variazione della massa di ghiaccio sulle calotte polari e nei ghiacci e quella del livello dei mari.

Le missioni gravimetriche del satellite GOCE (*Gravity field and steady Ocean Circulation Explorer*) dell'European Space Agency (ESA) (lanciato il 17 marzo 2009 e rientrato in atmosfera l'11 novembre 2013) e dei satelliti GRACE (lanciati il 17 marzo 2002 e rimasti operativi fino ad ottobre 2017) hanno fornito, rispettivamente, sia la prima mappa globale ad alta risoluzione spaziale (100×100 km) e precisione (<1mGal) del campo gravitazionale terrestre, sia la prima misura della sua variazione nel tempo con frequenza mensile (seppur limitata ad una risoluzione di ~500×500 km). Sulla scia di GRACE, è stata lanciata il 22 maggio 2018 la missione GRACE *Follow-On* (GFO) per assicurare, con le stesse prestazioni del suo predecessore, la continuità del monitoraggio delle risorse idriche terrestri contenute nei grandi ghiacciai e nel sottosuolo.
L'obiettivo che si prefiggono le missioni gravimetriche di prossima generazione è quello di misurare la variazione del campo gravitazione con alta risoluzione spaziale (dell'ordine dei 100 km) e temporale (alcuni giorni) con sostanziali benefici in tutti i campi di applicazione.
Mentre GOCE ha mappato il campo gravitazionale terrestre mediante un ***gradiometro*** (insieme di 6 accelerometri disposti su tre assi ortogonali e distanziati di 0.5 m), la tecnica di misura ritenuta attualmente più appropriata per l'obiettivo della prossima generazione di missioni gravimetriche è quella ***satellite-to-satellite tracking***: una coppia di satelliti in orbita bassa (~350 km),

co-orbitanti ad una distanza relativa dell'ordine di 100 km, costituisce il "sensore gravitazionale"; misurando la variazione di distanza tra i satelliti si ottiene l'informazione sulle forze gravitazionali che hanno prodotto quella variazione. Questa tecnica è già stata utilizzata dai satelliti GRACE, dove la distanza inter-satellitare (~220 km) veniva misurata con un sistema a radiofrequenza con una risoluzione di circa 10 micrometri. Per raggiungere le prestazioni richieste alle nuove missioni gravimetriche la misura di distanza dovrà essere effettuata con una risoluzione 1.000 volte migliore (circa 10 nanometri), ovvero con un errore relativo di 10^{-13} su una distanza di 100 km. Questo risultato è ottenibile solo mediante ***interferometri*** che utilizzano ***fasci laser*** con frequenza estremamente stabile. L'acquisizione ed il mantenimento del collegamento ottico tra i due satelliti mediante i fasci laser richiede, inoltre, un sistema di puntamento ottico molto sofisticato. Un ***interferometro laser*** sperimentale è imbarcato su GFO, in aggiunta allo strumento principale ancora costituito dal sistema di misura a radiofrequenza, e la sua funzionalità è stata verificata con successo per la prima volta in orbita.

Un altro apparato di misura fondamentale per queste missioni è un ***accelerometro*** (o insiemi di accelerometri) ultrasensibile (simile a quelli che hanno volato su GOCE), che ha il compito di misurare l'accelerazione prodotta sul satellite dalle forze non gravitazionali (essenzialmente la resistenza aerodinamica prodotta dall'atmosfera residua presente alla quota del satellite). L'effetto di queste accelerazioni deve essere rimosso dalla variazione di distanza misurata dall'***interferometro laser*** per isolare il risultato del solo campo di forze gravitazionali. A sua volta, il raggiungimento della massima prestazione dell'accelerometro richiede la compensazione, entro un certo livello, delle forze non gravitazionali agenti sul satellite mediante ***propulsori elettrici*** dotati di elevato impulso specifico (per consentire una lunga vita operativa a bassa quota con una ridotta quantità di propellente) e in grado di modulare la spinta in un ampio intervallo con elevata risoluzione. Questa tecnica di compensazione è stata sperimentata con successo nella missione GOCE.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

La realizzazione di missioni gravimetriche di nuova generazione basate sull'interferometria *laser* permetterà di disporre di un servizio di monitoraggio senza precedenti delle variazioni a breve, medio e lungo termine dei ***fenomeni geofisici*** che coinvolgono spostamenti di massa (scioglimento di ghiacciai, variazione dei livelli delle acque oceaniche e continentali in superficie e nel sottosuolo, deformazioni della crosta terrestre, circolazione atmosferica, ecc..) e conseguentemente di tenere sotto controllo la ***dinamica della biosfera*** e l'***evoluzione climatica*** del nostro pianeta sempre più influenzata da processi antropogenici che mettono a rischio la sussistenza, a medio-lungo termine, delle condizioni e risorse indispensabili per l'esistenza del genere umano.

Dello sviluppo delle tecnologie fondamentali associate a questa missione (interferometri *laser* ad alta risoluzione operanti su lunghe distanze, banchi ottici ultra-stabili, sistemi di puntamento di precisione, accelerometri ultrasensibili, sistemi di compensazione fine delle forze non gravitazionali) potranno altresì beneficiare altre missioni scientifiche (ad es. per l'osservazione delle onde gravitazionali o la verifica del principio di equivalenza), l'interferometri ottici per osservazioni ad altissima risoluzione della Terra e dei pianeti, e le applicazioni di telecomunicazione spazio-terra e spazio-spazio operanti in banda ottica.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Grazie alla realizzazione del satellite GOCE (Figura 1.1), Thales Alenia Space in Italia ha acquisito competenze uniche nelle tecniche di compensazione di forze non gravitazionali basate sull'utilizzo di propulsori elettrici proporzionali e della ***calibrazione*** in volo di accelerometri ultrasensibili ed ha partecipato a diversi progetti di definizione delle ***missioni gravimetriche di nuova generazione*** (Figura 1.2) e dello sviluppo di alcune delle tecnologie associate. In particolare, in collaborazione con l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM), sono stati realizzati prototipi dell'***interferometro laser*** per la misura della distanza inter-satellitare e del ***sistema metrologico*** per l'acquisizione e il mantenimento del ***puntamento del fascio laser*** (Figura 1.3). Oltre a ciò, in collaborazione con il Politecnico di Torino, sono state sviluppate le metodologie di ***controllo della formazione*** dei due satelliti gravimetrici combinato con quello dell'altezza orbitale della ***compensazione delle forze aerodinamiche*** e del ***puntamento del fascio laser***.

L'industria italiana è all'avanguardia anche nel campo della ***micro-propulsione ad azoto***, mentre attualmente la *leadership* delle altre tecnologie fondamentali è detenuta da altre aziende europee:

- accelerometri ultrasensibili (Francia);
- propulsori elettrici a spinta variabile (Germania, Gran Bretagna);
- sorgenti laser stabilizzate e interferometri a rigenerazione di potenza (Germania).

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

Circa 10 milioni di euro per lo sviluppo delle tecnologie presiedute dalle aziende italiane.

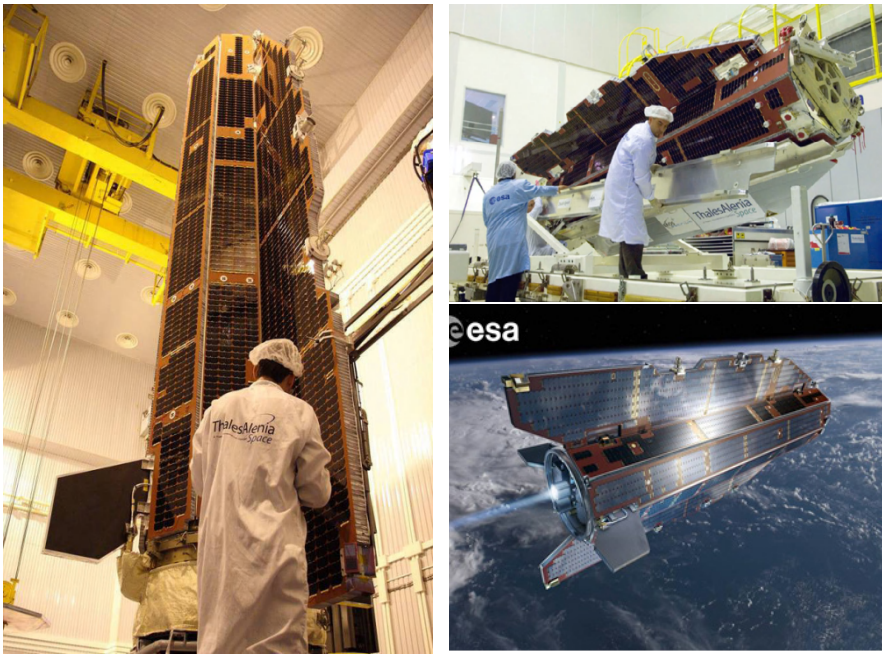


FIG. 1.1 GOCE REALIZZATO DA THALES ALENIA SPACE IN ITALIA, È STATO IL PRIMO SATELLITE A PORTARE IN ORBITA UN GRADIOMETRO PER LA MISURA DEL CAMPO GRAVITAZIONALE TERRESTRE E AD ESSERE DOTATO DI UN SISTEMA DI COMPENSAZIONE DELLA FORZA AERODINAMICA PRODOTTA DALL'ATMOSFERA RESIDUA MEDIANTE UN PROPULSORE ELETTRICO A IONI A SPINTA VARIABILE. (CREDIT ESA)

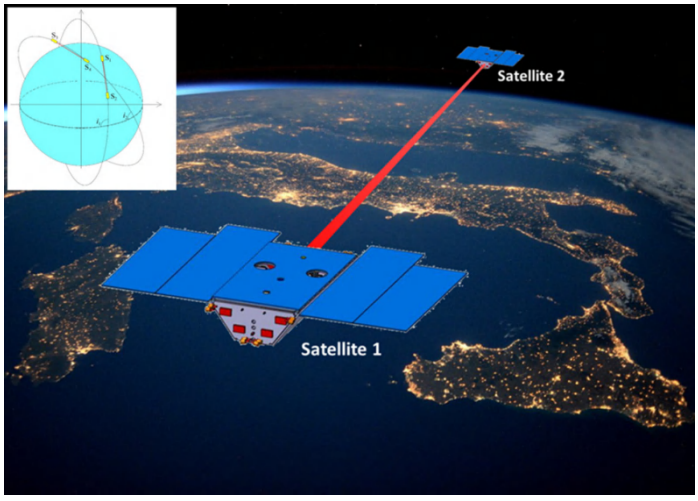


FIG. 1.2 LA MISSIONE GRAVIMETRICA DI NUOVA GENERAZIONE (NEXT GENERATION GRAVITY MISSION) PROGETTATA DA THALES ALENIA SPACE IN ITALIA CONSISTE DI DUE COPPIE DI SATELLITI, UNA IN ORBITA POLARE ED UNA IN ORBITA A MEDIA INCLINAZIONE, LA CUI DISTANZA (ff100 KM) CONTINUAMENTE MODIFICATA DAL CAMPO GRAVITAZIONALE TERRESTRE VIENE MISURATA DA UN INTERFEROMETRO LASER CON LA RISOLUZIONE DI POCHI NANOMETRI. (CREDIT THALES ALENIA SPACE)

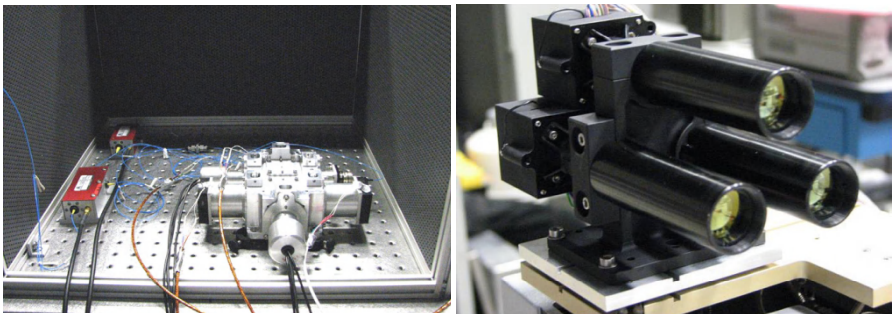


FIG. 1.3 PROTOTIPI DELL'INTERFEROMETRO LASER PER LA MISURA DELLA VARIAZIONE DELLE DISTANZA INTER-SATELLITARE (A SINISTRA) E DEL SISTEMA METROLOGICO PER L'ACQUISIZIONE E IL MANTENIMENTO DEL PUNTAMENTO DEL FASCIO LASER (A DESTRA), REALIZZATI DA THALES ALENIA SPACE IN COLLABORAZIONE CON INRIM. (CREDIT THALES ALENIA SPACE)

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 2

TECNOLOGIE PER L'ESPLORAZIONE SOLARE

Le missioni spaziali offrono i seguenti vantaggi:

- osservare il Sole a tutte le lunghezze d'onda dello spettro elettromagnetico, senza filtri e disturbi creati dalla presenza e dalla turbolenza dell'atmosfera terrestre;
- monitorare ininterrottamente il Sole per periodi di diversi anni e con gli stessi strumenti;
- compiere osservazioni del Sole, misure del vento solare e del campo elettro-magnetico solare a distanze diverse da quella della Terra dal Sole e a diverse latitudini fuori dal piano dell'eclittica (piano contenente l'orbita terrestre);
- osservare particolari della superficie solare per periodi di tempo non vincolati alla rotazione sinodica del Sole (periodo di rotazione riferito alla Terra).

In particolare lo spazio costituisce l'ambiente ideale per l'osservazione continua della ***corona solare*** (la regione che circonda il disco da cui prende origine il vento solare) mediante opportuni strumenti, detti coronografi, che permettono di occultare la luce del disco creando un'eclisse artificiale. Infatti, l'utilizzo dei coronografi a terra è limitato dal fondo di luce solare diffusa dall'atmosfera che impedisce l'osservazione dei dettagli della corona, la cui luminosità è meno di un milionesimo di quella del disco del Sole.

Un ***coronografo*** consiste essenzialmente di un sistema ottico che blocca e retro-riflette la luce proveniente dal disco solare lasciando passare solo quella proveniente dalla corona, e di un telescopio per la generazione dell'immagine coronale. La luce coronale, nella banda visibile, è talmente tenue che non solo la luce diretta proveniente dal disco, ma anche quella che indirettamente può raggiungere il piano focale (prodotta da diffrazione e diffusione all'interno del telescopio) deve essere attenuata di circa un miliardo di volte rispetto all'intensità del disco solare per permettere l'osservazione della corona con un buon contrasto. Questo richiede:

- una lavorazione molto precisa dell'apertura dello strumento, **una levigatura estremamente spinta** delle superfici ottiche ed un livello di **pulizia particellare estremo** su tutte le superfici interne del telescopio (per limitare la diffusione);
- l'interposizione lungo il cammino ottico di una serie di **diaframmi** e l'applicazione di **un rivestimento a bassissima riflettività** su tutte le superfici interne del telescopio (con la sola esclusione delle ottiche) per bloccare o attenuare la luce diffratta e diffusa;
- particolari **tecniche e dispositivi per l'allineamento preciso**, in fase di integrazione, delle ottiche del telescopio coronale e dei diaframmi per bloccare la luce diretta e indiretta del disco solare;
- una struttura con alta stabilità dimensionale per mantenere questi allineamenti durante il lancio del satellite e durante tutta la vita operativa della missione.

La progettazione e realizzazione di un coronografo diventa via via più complessa in funzione del numero di bande dello spettro elettromagnetico in cui si vuole osservare la corona e dell'aggiunta di funzioni polarimetriche e spettroscopiche.
La verifica a terra delle prestazioni di un coronografo spaziale richiede, inoltre, uno speciale apparato dotato di una sorgente di luce in grado di simulare (in vuoto) quella proveniente dal disco e dalla corona che ha lo stesso spettro, angolo di vista e rapporto di intensità.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Lo studio ed il monitoraggio del Sole sono importanti non solo da un punto di vista strettamente scientifico, ma per comprendere, prevedere e contrastare o mitigare gli effetti che il Sole esercita sui nostri apparati elettrici ed elettronici, sui sistemi di telecomunicazione e navigazione, sugli astronauti e sui satelliti artificiali attraverso il bombardamento delle particelle cariche che costituiscono il ***vento solare***. L'esigenza di sviluppare un sistema globale di ***meteorologia spaziale*** in grado di prevedere con precisione e tempestività le perturbazioni eliosferiche (il cosiddetto ***Space Weather***) ed il loro effetto sul nostro ambiente naturale (come ad esempio le ***tempeste geomagnetiche*** provocate dell'interazione del vento solare con la ionosfera e magnetosfera della Terra) al fine di salvaguardare le attività umane sulla superficie terrestre e nello spazio, è ormai conclamata a livello internazionale.
Il ***monitoraggio della corona*** è elemento indispensabile per realizzare un efficace sistema di meteorologia spaziale, in quanto l'attività eruttiva del Sole si manifesta appieno proprio nella corona esterna, che può essere osservata esclusivamente dallo spazio. I coronografi sono quindi strumenti fondamentali di ogni missione scientifica e/o applicativa dedicata allo studio e al monitoraggio del Sole.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Le competenze europee più avanzate nel campo della ***coronografia solare*** risiedono in Italia, grazie alla presenza di una importante comunità scientifica attiva nel campo dell'astrofisica solare e all'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) che ha investito e investe notevoli risorse nella realizzazione dei coronografi per le missioni SOHO (*Solar and Heliospheric Observatory*) e *Solar Orbiter*, entrambi effettuate sotto la guida ESA con il contributo della NASA.
Lo spettrometro dell'*UltraViolet Coronagraph Spectrometer* (***UVCS***), per misurare densità, composizione e temperatura della corona solare, è stato realizzato in Italia da Alenia Spazio (ora Thales Alenia Space in Italia) e Officine Galileo (ora Leonardo Company) con finanziamento dell'ASI. UVCS è uno dei principali strumenti del satellite SOHO. Lanciato il 2 dicembre 1995 ed operativo fino a tutto il 2016, SOHO ha già osservato un intero ciclo solare ed è uno dei satelliti di cui si avvale lo *Space Weather Prediction Center* (SWPC) per il monitoraggio e la previsione degli eventi solari e geofisici.
Lo strumento ***Metis (Mid-infrared ELT Imager and Spectrograph)***, promosso da una comunità scientifica internazionale guidata dal *Principal Investigator* Prof.ssa Ester Antonucci (INAF-OATo) e finanziato dall'ASI, è un coronografo per l'osservazione simultanea della corona solare in luce visibile polarizzata e nella riga spettrale Lyman-α dell'idrogeno a 121.6 nm. Metis è stato realiz-

zato da Thales Alenia Space in Italia in collaborazione con OHB Italia ed è stato installato sul satellite Solar Orbiter, lanciato il 10 febbraio 2020. Con questa missione, il Sole verrà osservato per la prima volta dalla minima distanza di 0.28 Unità Astronomiche (28% della distanza media Terra-Sole) e dalla massima latitudine solare di 34°. L'estrema vicinanza dal Sole comporterà temperature superiori ai 400 gradi all'apertura di Metis, mentre i rivelatori dovranno essere mantenuti al di sotto dello zero; ciò rappresenta un'ulteriore sfida tecnologica da affrontare nella realizzazione di questo strumento in termini di scelta dei ***materiali strutturali*** (Figura 2.1) e progettazione del ***controllo termico***. Da notare che l'intero satellite ed i suoi strumenti saranno protetti da uno speciale ***scudo termico*** (Figura 2.2), anch'esso realizzato da Thales Alenia Space in Italia. Sempre nell'ambito del progetto Metis, è stato installato a Torino presso il centro ALTEC uno speciale apparato (*Optical Payload Systems facility*) in grado di simulare la luce proveniente dal disco e dalla corona solare nella banda visibile e ultravioletta, poi utilizzato per l'allineamento, la verifica delle prestazioni e la calibrazione del coronografo. La comunità scientifica italiana ha inoltre sviluppato algoritmi per l'identificazione automatica e la caratterizzazione delle ***eruzioni coronali*** (*Coronal Mass Ejections*).

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

Circa 20 milioni di euro per realizzare un coronografo dedicato allo *Space Weather*.

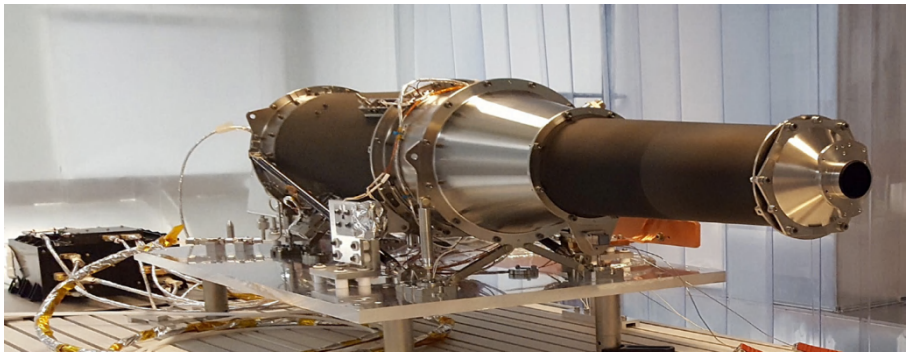
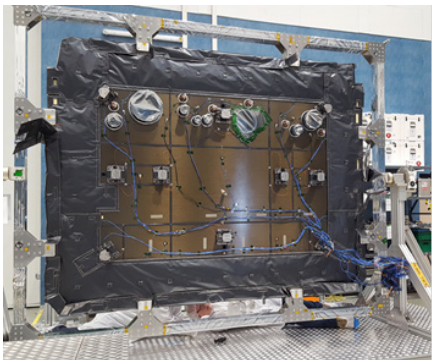


FIG. 2.1 MODELLO DI VOLO DEL CORONOGRAFO METIS, INTEGRATO DA THALES ALENIA SPACE IN ITALIA NELLA OPTICAL PAYLOAD SYSTEMS FACILITY. LA STRUTTURA DEL CORONOGRAFO È REALIZZATA IN MATERIALI COMPOSITI E TITANIO PER GARANTIRE LA DOVUTA STABILITÀ E RESISTENZA ALLE ALTE TEMPERATURE.
(CREDIT THALES ALENIA SPACE)



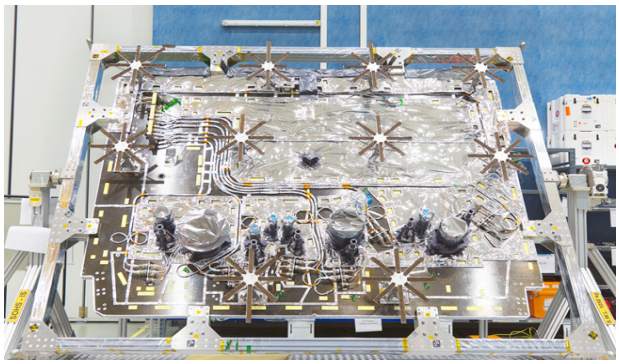


FIG. 2.2 LO SCUDO TERMICO REALIZZATO DA THALES ALENIA SPACE IN ITALIA PROTEGGERÀ SOLAR ORBITER ED I SUOI STRUMENTI, TRA CUI METIS, DAL FLUSSO DI RADIAZIONE TERMICA PROVENIENTE DAL SOLE CHE ALLA MINIMA DISTANZA DI 0.28 UNITÀ ASTRONOMICHE RAGGIUNGERÀ 17 KW/M2.
(CREDIT THALES ALENIA SPACE)

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 3

STRUTTURE AVANZATE ULTRALEGGERE E ADATTIVE

Le **strutture ultraleggere e adattive** sono una possibile soluzione alle sfide economiche contemporanee per l'accesso e l'esplorazione dello Spazio. Progettate con metodi non convenzionali e basate anche sull'uso di materiali e processi innovativi, sono ormai diffuse in varie tipologie: si passa dalle strutture gonfiabili a quelle termoelastiche ultra-stabili, dai sistemi *morphing* (strutture a forma variabile) a sistemi di dispiegamento cinematici. Tali configurazioni si prestano a molte applicazioni in ambito spaziale, come quelle inerenti le capsule di rientro, i missili lanciatori e finanche le grandi infrastrutture come la Stazione Orbitante.

Il recente sviluppo di materiali leggeri con eccellenti prestazioni, di processi e tecnologie innovative (come la cosiddetta stampa 3D) facilita l'ulteriore sviluppo di quei concetti che si presuppone possano dar luogo ad un salto tecnologico epocale. I **metamateriali a forma variabile** basati su architetture elementari ibride (*Mirzaali, M. J., et al. "Shape-matching soft mechanical metamaterials", Scientific Reports 8.1, 2018: 965*) o le strutture basate sulla **progettazione multiscala** (*Neville, R. M., et al. "A Kirigami shape memory polymer honeycomb concept for deployment", Smart Materials and Structures, 26.5, 2017: 05LT03*) sono in grado di garantire deformazioni altrimenti inaccessibili. I materiali polimerici modificati uniti a soluzioni progettuali innovative permettono la realizzazione di **strutture leggere ad elevata stabilità,** come dimostrato nei programmi aeronautici Boeing *787* ed Airbus 350.

Le applicazioni spaziali sono generalmente più gravose e più complesse da realizzare; allo stesso modo, però, è rilevante il vantaggio che ne può derivare in termini di riduzione di massa e, quindi, di costo al lancio. Ad esempio, la **stabilità termica** e la **resistenza alle microfratture** sono alcuni tra i più importanti requisiti operativi ai quali le strutture devono rispondere; la sopravvivenza a cicli termici estremi porta a problemi meccanici, a micro distorsioni superficiali, a distorsioni incontrollate di forma ed alla perdita delle proprietà termo-ottiche. Materiali compositi generati dall'unione di **fibre ad elevate prestazioni con resine polimeriche o ceramiche modificate** può permettere di ottenere le necessarie caratteristiche meccaniche tramite rinforzi ormai comunemente utilizzati, caratterizzati da un coefficiente di dilatazione termica pressoché nullo oltre che da rigidezze molto elevate.

Per i lanciatori, la sostituzione dei **materiali metallici o compositi con quelli polimerici** per **serbatoi criogenici**, rappresenta una meta ormai a portata di mano, a cui puntano molte grandi aziende d'Oltreoceano. A temperature molto basse, la tenuta meccanica deve essere unita a livelli elevati di impermeabilità, conducibilità elettrica ed isolamento termico; poiché i **materiali polimerici** possono variare le proprie caratteristiche, essi sono una soluzione tecnologica idonea per quei pro-

blemi. **Polimeri modificati** sono alternative valide a materiali classici e costosi come il Berillio e lo Zerodur per banchi ottici e grandi superfici riflettenti.

Per le capsule di rientro, **materiali compositi abbinati a tecnologie innovative come il "*fiber placement*"** consentono di realizzare superfici esposte ad elevati flussi termici, cellule di sopravvivenza e camere pressurizzate più leggere a parità di prestazioni. L'adozione di nuovi processi e tecnologie per la messa a punto di **strutture dispiegabili e adattive** può ulteriormente migliorare le prestazioni di veicoli spaziali riutilizzabili. Strutture che dispiegate siano in grado di sostenere i carichi meccanici e termici caratteristici del rientro danno luogo a diversi vantaggi per piccoli e grandi sistemi, inclusi quelli destinati all'esplorazione planetaria. Soluzioni capaci di variare la forma degli **scudi termici di capsule da rientro** possono accrescere la dissipazione termica in atmosfera e l'efficienza aerodinamica nella fase di volo.

Alla base di tutti questi concetti vi è lo sviluppo di **sistemi di controllo anche autonomi** che governino le modifiche della configurazione in funzione degli obiettivi prefissati, permettendo il volo dalla fase ipersonica a quella subsonica, fino all'atterraggio morbido senza uso di paracadute.

Per i velivoli di rientro a "fusoliera portante" o *lifting body* la manovrabilità è un fattore critico e l'aver accesso a diversi profili durante la generica missione rappresenta un vantaggio unico. Quasi simmetricamente, i velivoli "alati", più tradizionali, garantiscono migliori performance aerodinamiche ma hanno il chiaro svantaggio di esporre le superfici portanti agli elevati flussi termici del rientro; avere la capacità di richiudere ed aprire le ali all'occorrenza ne riduce molto la criticità.

In ambito nazionale vi è una logica spinta ad **utilizzare sistemi di lancio Italiani**, il che porta naturalmente ad identificare i lanciatori VEGA (Vettore Europeo Generazione Avanzata di AVIO S.p.A.) come riferimento per la messa in orbita di sistemi da rientro spaziale (vedi ad esempio progetti dei veicoli USV3, IXV, *Space Rider* – classe 2500 kg). Visti i volumi disponibili nel *fairing* (spazio destinato all'alloggiamento del carico pagante), questa scelta determina inevitabilmente l'adozione di configurazioni tozze (a corpo portante) oppure snelle e alate ma con fusoliere assai poco voluminose. Per tali motivi, le **ali dispiegabili** permettono di superare le difficoltà di accomodamento nel lanciatore della navicella, e quelle in fase di rientro, offrendo maggiori capacità di carico e di manovra durante il volo, sino all'atterraggio.

Per questo tipo di architetture, al di là del sistema cinematico di *morphing*, la maggiore sfida tecnologica è rappresentata dall'accoppiamento tra struttura alare e scudo termico che deve assorbire elevati flussi pur limitando il peso proprio e garantendo una pressochè perfetta continuità strutturale Le **tecniche di ottimizzazione topologica e di produzione in stampa 3D** (o ALM, *Additive Layer Manufacturing*), giocano un ruolo fondamentale nello sviluppo di strutture alari innovative ad alta resistenza (in leghe di titanio) così come lo sviluppo di **sistemi di protezione termica** (*TPS - Thermal Protection System*) a basso costo **in materiali ceramici a base di Carburo di Silicio rinfozati con fibre di carbonio (CMC in C/SiC).** Queste soluzioni permettono di superare l'inevitabile aggravio di peso legato alla presenza dei cinematismi rispetto alla stuttura "inerte", pur con complicazioni ancora da risolvere (piccoli raggi di curvatura e connessi alti stress indotti dal carico termomeccanico).

Allo stato, sono due gli approcci più diffusi per la realizzazione di strutture dispiegabili, basati rispettivamente su **cinematismi e materiali rigidi (quasi un'evoluzione delle strutture classiche)**

o sistemi gonfiabili. Gli studi sin qui condotti indicano che i primi sono più efficienti per piccoli sistemi (fino a 2m di diametro), mentre i secondi sono vantaggiosi per oggetti di grandi dimensioni (10m di diamentro ed oltre).

Quasi al confine delle applicazioni sinora presentate, vi è l'uso di **strutture gonfiabili** per la realizzazione delle grandi infrastrutture spaziali necessarie all'esplorazione umana e non solo, ad esempio per la messa a punto di grandi superfici dispiegabili o di moduli abitati, superando i limiti di spazio utile dei lanciatori. Un esempio di modulo abitabile gonfiabile è riportato in Figura 3.1**,** da "*Design, Verification and Manufacturing Aspects Relevant for Inflatable Modules – ESA A0/1-4788/05/NL/IA*". Tali soluzioni sono adottabili anche per l'insediamento di avamposti su pianeti o lune: in questo caso, l'impiego di elementi polimerici adatti all'irrigidimento in orbita, con tecniche di esposizione a sorgenti esterne o interne, rappresenta una valida soluzione alternativa in fase di sviluppo.

Per le future Stazioni Spaziali o futuri Avamposti di superficie si prevede un massiccio utilizzo dei cosiddetti *airlock* per le attività extraveicolari (Figura 3.2 da: "*STEPS2 - Progetto cofinanziato dalla U.E. sulla Misura Piattaforme Innovative, POR FESR 2007/2013, Fase 2*"). Per questi elementi, soggetti a pressurizzazione e depressurizzazione, la tecnologia del gonfiabile/espandibile si presta in modo quasi naturale.



FIG. 3.1 PROTOTIPO DI MODULO ABITATO GONFIABILE (PROGRAMMA ESA). (CREDIT THALES ALENIA SPACE)

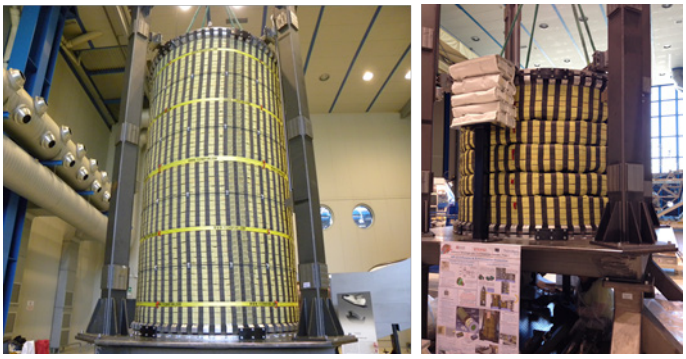


FIG. 3.2 DIMOSTRATORE DI AIRLOCK GONFIABILE/ESPANDIBILE (PROGRAMMA REGIONALE STEPS2). (CREDIT THALES ALENIA SPACE ITALIA)

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Le strutture ultraleggere e adattive rappresentano una possibile soluzione alla sfida economica per l'accesso e l'esplorazione dello spazio. Le tecnologie basate su materiali polimerici permetteranno di realizzare banchi ottici ultra-stabili, sistemi di puntamento di precisione, antenne di grandi dimensioni, moduli pressurizzati, capsule di rientro, lanciatori ad elevate prestazioni. Si attende che tali tecnologie avranno ricadute soprattutto in settori connessi alla protezione dell'uomo in ambienti ostili.

Le strutture adattive in campo spaziale permettono di ottimizzare le prestazioni del veicolo durante tutta la missione, modificandone la forma geometrica. Ad esempio, da tozza (in fase di rientro, per ridurre i flussi termici ed aumentare la resistenza), ad aguzza (durante i segmenti di volo, dall'ipersonico all'atterraggio). Come riferimenti, si vedano ad esempio: "*Adaptive Deployable Entry and Placement Technology*", ADEPT, oppure "*Morphing Hypersonic Inflatable Aerodynamic Decelerator",* HIAD. Le tecnologie *morphing* possono modulare l'efficienza aerodinamica (L/D) nelle diverse fasi di volo e aumentare la manovrabilità della capsula consentendo un miglior controllo della traiettoria e riducendo così le incertezze di atterraggio (*landing footprint*).

La Visione Strategica di ASI e le linee programmatiche delle Conferenze Ministeriali ESA individuano lo sviluppo di **sistemi riutilizzabili di trasporto spaziale** per orbita terrestre come il cardine per la fattibilità dei futuri programmi scientifici. Anche in questo caso, la disponibilità in ambito nazionale delle tecnologie abilitanti per la realizzazione di **strutture dispiegabil**i facilmente stivabili a bordo di veicoli per l'accesso allo Spazio, come i sistemi di protezione termica *low cost* CMC in C-SiC per bordi d'attacco alare, permetterebbe un significativo passo in avanti verso la riutilizzabilità e la flessibilità operativa rispetto allo stato dell'arte Europeo dei sistemi di rientro (ad es., IXV, *Space Rider*), determinando una riduzione drastica di tempi e costi tra due missioni successive (*turn around*, p.e., X-37, USA). Ciò si inserisce in un processo di rafforzamento Italiano nel settore delle **tecnologie per il rientro**, consolidando una già chiara *leadership* in ambito sistemistico.

Per quanto concerne **l'esplorazione extraplanetaria**, con le ultime missioni marziane NASA, sono stati raggiunti i limiti tecnologici attuali di massa trasferibile sulla superficie di Marte. Per masse maggiori, necessarie per ulteriori ricognizioni robotizzate ed anche umane, occorrerebbero scudi

temici di diametro maggiore per la generazione della dovuta resistenza aerodinamica. Tuttavia, se costruiti in un unico blocco tali scudi risulterebbero troppo ingombranti anche per i lanciatori più potenti. Uno scudo che possa essere ripiegato al lancio in funzione degli spazi disponibili del vettore prescelto, ma che una volta nello spazio possa distendersi fino alle dimensioni prescritte, permetterebbe di superare i limiti correnti. Lo sviluppo tecnologico di **scudi dispiegabili** avrebbe anche l'interessante conseguenza di permettere in principio di ridurre a piacere il parametro balistico, definito come il rapporto tra la massa e la superficie frenante del un corpo, ottenendo il doppio beneficio di una riduzione dei flussi termici e dei carichi meccanici indotti dall'interazione con l'atmosfera. Ciò porterebbe ad allargare la platea dei materiali utilizzabili.

Sistemi gonfiabili e sistemi espandibili sono destinati a costituire nel prossimo futuro una valida alternativa ai moduli metallici per incrementare il volume abitabile in orbita ed in avamposti di superficie in missioni di media e lunga durata. Inoltre, vi sarebbe la possibilità di lanciare uno o più moduli compattati nello stesso volume offerto dai lanciatori attuali e da quelli della prossima generazione.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

L'Italia vanta un'esperienza significativa nei processi e nelle tecnologie per l'utilizzo di materiali polimerici in applicazioni spaziali. Grazie allo sviluppo delle capsule di rientro IXV (*intermediate eXperimental Vehicle*), e ARD (*Atmospheric Reentry Demonstrator*), nonché di molti elementi della Stazione Spaziale Internazionale (ISS) e di tanti satelliti artificiali, Thales Alenia Space in Italia ha acquisito competenze uniche nelle tecniche di utilizzo dei processi e delle tecnologie basate sull'utilizzo di materiali polimerici rinforzati con svariate tipologie di fibre (ceramiche, carbonio, ecc.). Negli stabilimenti aziendali di Torino si stanno sviluppando, da alcuni anni, le tecnologie per la messa a punto di moduli spaziali gonfiabili ed espandibili, e *airlock* di nuova generazione, inclusa la realizzazione di prototipi. Thales Alenia Space in Italia propone lo sviluppo applicativo di strutture ultra leggere, con la partecipazione di Enti di Ricerca (come CIRA – Centro Italiano di Ricerche Aerospaziali) ed Università. Inoltre, Thales Alenia Space in Italia ha partecipato a diversi progetti di definizione di nuovi materiali e processi, producendo numerosi prototipi e dimostratori tecnologici.

In ambito Nazionale sussiste una congenita carenza nello **sviluppo dei materiali di base**: l'industria chimica non ha generalmente dato molta attenzione ai temi dell'aerospazio. Ad esempio, non esiste un sito italiano per la produzione di **fibre ceramiche o di carbonio** per la realizzazione di pre-impregnati; invece la vicina Spagna, ad esempio, pur sotto l'egida di una grande industria americana ha un proprio sito di manifattura.

L'industria Italiana è invece all'avanguardia nel campo delle **strutture** e ricopre un ruolo di *leadership* delle tecnologie fondamentali e dei processi di costruzione basati sull'uso di materiali sviluppati in altri paesi quali, ad esempio, fibre di rinforzo (Germania, USA e Giappone) e resine (Germania, Regno Unito, USA e Giappone). Per quanto concerne i **materiali ceramici**, l'Italia vanta diverse tecnologie all'avanguardia, sviluppate da Centri di Ricerca come il CIRA, il CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche), il Rina Centro Sviluppo Materiali (CSM) e da aziende quali Brembo e Petroceramics. L'Istituto del CNR ISTEC (Istituto di Scienza e Tecnologia dei Materiali Ceramici) ha

maturato una decennale esperienza nell'ambito dei materiali ceramici massivi per temperature elevatissime (*Ultra High Temperature Ceramic* – UHTC) e da diversi anni sta sviluppando tecnologie per la realizzazione di UHTC rinforzati con fibre corte e lunghe (UHTC *Matrix Composite* – UHTCMC). Con il supporto di CIRA, il RINA CSM ha sviluppato tecnologie per la deposizione di materiali ceramici UHTC su substrati ceramici e metallici, anche in cooperazione con l'americana AFRL (*Air Force Research Laboratory*). Le tecnologie relative ai materiali ceramici a base di carburo di silicio rinforzati con fibre di carbonio (CMC) sono invece consolidate all'interno di CIRA, Brembo e Petroceramics: il *know-how* delle tre aziende ha permesso lo sviluppo del materiale ISiComp che verrà usato per le superfici di controllo del prossimo veicolo spaziale europeo *SPACERIDER*. La tedesca Inova Ceram produce e commercializza in Italia, tramite la Insultecno, un materiale a base di ossidi di alluminio (*Oxide Ceramic Matrix Composite – OCMC*) realizzato con il "NEXTEL" prodotto da 3M. Tale materiale, è caratterizzato da proprietà generalmente inferiori ai CMC (ad es., il già citato ISiComp), ma presenta vantaggi in termini di processo e costi.

Per quanto riguarda i **materiali basati sul grafene**, l'Italia è ben presente nella *Flagship* Europea con Nanesa, impresa produttrice di grafene nanoplatelet (GNP) e con l'Istituto del CNR IPCB (Istituto per i Polimeri Compositi e Biomateriali) che ha sviluppato insieme ad altri partner materiali preimpregnati ad elevatissimo tenore di GNP. Sono in sviluppo applicazioni aerospaziali: diffusori di calore, elementi termoelettrici, antenne e riflettori IR, ecc.

L'Italia possiede diverse **tecnologie abilitanti per sistemi dispiegabili** applicabili al rientro attraverso i centri di ricerca e le aziende Nazionali. Il CIRA sta guidando un progetto che vede coinvolte l'Università di Napoli ed il consorzio ALI nello sviluppo di un prototipo di una capsula con scudo dispiegabile. Tale progetto è contemporaneo all'omologo progetto americano ADEPT (*Adaptable Deployable Entry and Placement Technology*) che ha eseguito il primo test nel 2018.

La NASA ha investigato sin dal 1960 la possibilità di adottare **sistemi dispiegabili per applicazioni spaziali** con l'obiettivo di migliorare la manovrabilità dei veicoli da rientro: in letteratura sono presenti molti brevetti registrati per lo più da scienziati e compagnie USA. Un esempio rilevante è il progetto X-38 nel quale era prevista la messa a punto del veicolo spaziale V-201, un dimostratore *"full scale"* senza pilota, dotato di 2 grosse *winglet* alari ripiegabili verso la fusoliera al fine di consentirne l'alloggiamento nel vano cargo dello *Space Shuttle* (Figura 3.3 – (a), da "*The X-38 V-201 Fin Fold Actuation Mechanism", di Christian Lupo, Brandan Robertson and George Gafka, NTRS Nasa Technical Report Server*). Nonostante il progetto sia stato cancellato nel 2003, il sistema di dispiegamento fu completamente progettato. Un secondo esempio è costituito dalla stadio orbitale del veicolo Sovietico Spiral (Figura 3.3 - (c), da: "*V. P. Lukashevich; Predecessor of Shuttle and Buran, Spiral Orbital Aircraft Programme"*). Il relativo dimostratore, dotato di ali ripiegate verso l'alto e dispiegabili durante la fase di volo subsonica, effettuò con successo 4 voli dal 1982 al 1984. Anche la più recente variante cargo senza pilota del Sistema Spaziale *Dream Chaser* (Figura 3.3 - (b), da *"Sierra Nevada Corporation"*) concepita per garantire alti livelli di riutilizzabilità e flessibilità, include un sistema di ali dispiegabili, tale da consentire l'alloggiamento del veicolo in più vettori, inclusi l'ATLAS V, l'ARIAN 5/6, il Delta IV, e l'H-IIB/III.

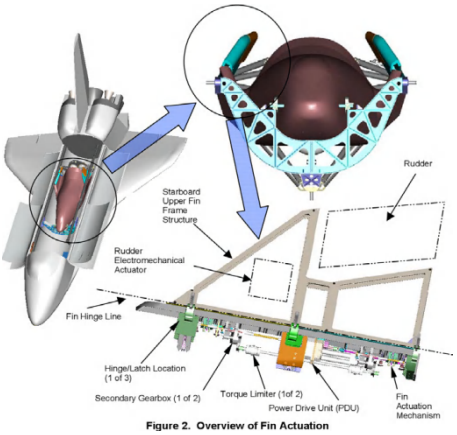
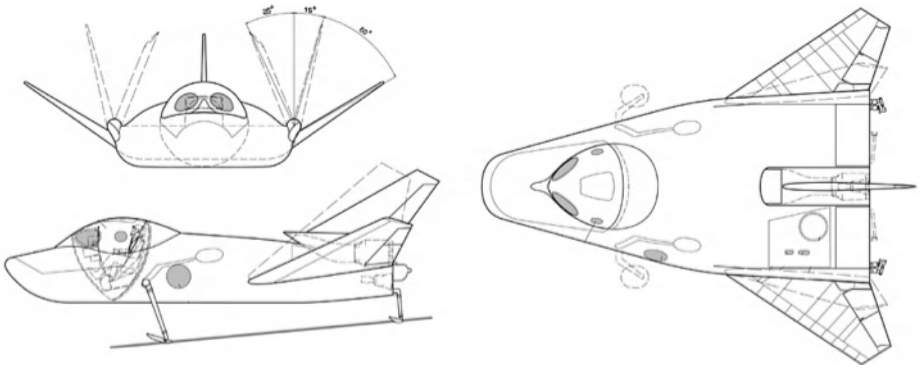


Figure 2. Overview of Fin Actuation

(A) X 38 – V201



(B) DREAM CHASER CARGO



(C) SPIRAL – RECONNAISSANCE VERSION

FIG. 3.3 ESEMPI DI APPLICAZIONE DI SISTEMI DI DISPIEGAMENTO ALARE A VEICOLI DA RIENTRO SPAZIALE (CREDIT CIRA)

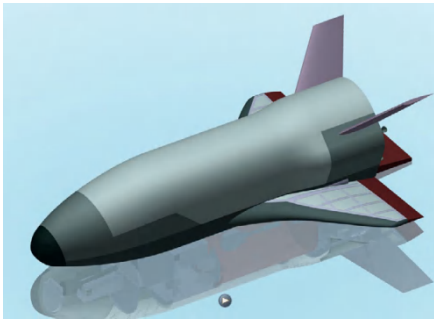


FIG. 3.4: USV3 DWS CONCEPT DESIGN (CREDIT CIRA)

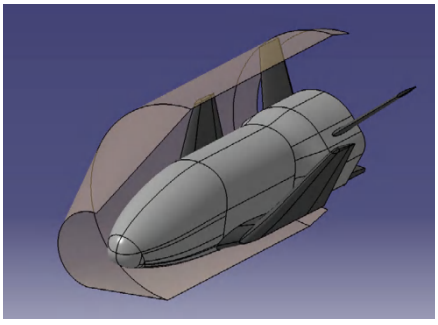


FIG. 3.5: USV3 DWS WITHIN VEGA FAIRING - WINGS DEPLOYED HOUSING - WING STOWED (CREDIT CIRA)

Sulla base dello scenario internazionale nel 2017 il CIRA ha avviato, nell'ambito del programma USV3 (*Unmanned Space Vehicle 3*), una linea di studio denominata DWS (*Deployable Wing System*), per lo sviluppo di un *Concept Design* (Figura 3.4 di un **veicolo di rientro di classe 2500 kg con ali dispiegabili** tale da poter essere alloggiato nel cargo del lanciatore VEGA C (Figura 3.5). Negli obiettivi rientra la messa a punto completa di dimostratori di componenti strutturali in ALM e sistemi di protezione termica con componenti CMC in C/SiC, da testare nel PWT (*Plasma Wind Tunnel*) del CIRA.

Nel campo delle **strutture gonfiabili**, l'italiana Ares Cosmo ex Aerosekur, vanta un notevole *know-how* nello sviluppo di scudi termici gonfiabili ed ha realizzato diversi prototipi poi testati presso i grandi impianti del CIRA. Con il CIRA stesso, Ares Cosmo parteciperà al progetto *European Flexible hEat Shields: Advanced TPS Design and Tests for Future In-Orbit Demonstration* (EFESTO) per la realizzazione ed il test in volo di uno scudo termico gonfiabile di grandi dimensioni. Sistemi analoghi sono sviluppati dalla NASA (programmi IRVE – *Inflatable Reentry Vehicle* ed HIAD – *Hypersonic Inflatable Aerodynamic Decelerator*) e dall'ESA (programma IRDT – *Inflatable Re-Entry and Descent Technology*).

L'attenzione dimostrata dall'aeronautica mondiale per le **strutture a forma variabile o morphing** (ad es., Airbus con i progetti SARISTU – *Smart Intelligent Aircraft Structures* ed SFWA – *Smart Fixed Wing Aircraft*; NASA, DARPA ed AFRL con i progetti *Adaptive Wing, Adaptive Flap,* e ACTE - *Adaptive Compliant Trailing Edge*; ecc.) ha dato il via a molte attività di ricerca per lo sviluppo di tecnologie industrialmente mature per strutture alari deformabili, realizzando una base di competenze potenzialmente trasferibile verso future applicazioni spaziali. FlexSys Technologies, cooperando con NASA, AFRL e Gulfstream ha provato in volo una ala dotata di un bordo d'uscita adattivo, realizzato sulla base di filosofie facilmente applicabili ad altri velivoli, esistenti e nuovi. Nel settore, l'Italia (per es., CIRA, Università di Napoli, Politecnico di Milano) vanta un *know-how* di livello internazionale nella messa a punto di sistemi strutturali adattivi per migliorare le prestazioni di aerei commerciali di medie dimensioni. Nel programma Europeo *Clean Sky 2* GRA-IADP (*Green Regional Aircraft – Integrated Aircraft Development Programme*), il CIRA è *leader* di un consorzio di circa venti partner per lo sviluppo operativo di sistemi adattivi di ipersostentazione per ali di nuova generazione (progetto *AirGreen2* – AG2).

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

Le strutture avanzate ultraleggere ed adattive ricoprono, come descritto, un vasto campo di applicazioni, ognuna delle quali richiede la messa a punto di tecnologie specialistiche e di frontiera. Si stima che le risorse economiche necessarie per svilupparle e mantenere il passo con la comunità internazionale, possano essere quantificate in circa 35 milioni di euro per il prossimo triennio.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 4

ROBOTICA E INTELLIGENZA ARTIFICIALE: UN BINOMIO STRATEGICO NELL'AMBITO DELL'ESPLORAZIONE SPAZIALE

Le missioni di esplorazione spaziale hanno un ruolo centrale nei programmi delle maggiori agenzie spaziali impegnate a sostenere la ricerca e sviluppo di molte tecnologie avanzate. La **Robotica** rappresenta un punto di sintesi tra molte di queste tecnologie e risulta una disciplina fondamentale per conferire ai sistemi capacità di operare autonomamente o più efficientemente in scenari complessi e rischiosi quali sono quelli di Orbita Terrestre, Luna, Marte e Asteroidi. L' splorazione e futura colonizzazione di corpi celesti, hanno indotto le agenzie spaziali, **ASI** e **ESA**, a pianificare alcune missioni specifiche **(*ExoMars*, *Lunar Polar Sample Return, Phobos Sample Return, Mars Sample Return*).** Tra gli ultimi successi scientifici va ricordata la missione **Rosetta**, culminata con la discesa di un *Lander* sulla superficie della cometa 67P, frutto di una intensa attività di ricerca e sviluppo condotta dalle industrie europee ed in particolare italiane.

L'Esplorazione Spaziale pone alla comunità scientifica e industriale obiettivi ambiziosi, realizzabili associando al complesso sviluppo della tecnologia un alto grado di efficienza, soprattutto in termini di ottimizzazione di massa e potenza per garantirne la lanciabilità e sopperire alla scarsità di energia disponibile.

La Robotica è una disciplina trasversale a molte applicazioni. Alcune tecnologie critiche della robotica a supporto dell'esplorazione planetaria sono l'**Autonomia di Bordo**, le Operazioni di "Superficie" come la **Mobilità/Navigazione di *Rover***, la capacità di **prelevare e manipolare campioni** di interesse scientifico, analizzarli "*in-situ*" o immagazzinarli e prepararli per un successivo "*Sample Return*" e la **Manipolazione robotica** (Bracci Robotici) di oggetti collaborativi e non collaborativi (ad es. per operazioni di *maintenance/deorbiting/refuelling* di Satelliti già in orbita). Una caratteristica dei sistemi usati per l'esplorazione è la loro altissima affidabilità per ridurre i rischi di guasti che possano pregiudicare la missione; non è certo semplice andare a riparare un sistema su Marte! È importante quindi definire metodi di verifica atti a provare le funzioni del sistema nelle varie condizioni operative e per questo scopo risulta essenziale lo sviluppo di appropriate aree tecnologiche e laboratori.

Nell'ambito dell'esplorazione spaziale è fondamentale lo sviluppo di **Sistemi Autonomi** tra cui i ***Rover***. Questi Sistemi Autonomi consentono di muoversi sulla superficie dei corpi celesti e richiedono l'impiego di molteplici tecnologie avanzate:

- architetture e logiche di **Gestione Autonoma** del sistema Rover. Le missioni interplanetarie comportano la necessità di sviluppare grande autonomia a bordo a causa delle distanze, delle difficoltà di contatto radio e del basso consumo di energia richiesto;
- tecniche per la **Localizzazione del Rover, Navigazione e definizione della traiettoria** da seguire sulla superficie;
- **percezione, generazione** ed **espansione** di mappe digitali;

- tecnologie e meccanismi legati alla "***Mobility***" di superficie e alla "Locomotion";
- tecnologie e meccanismi legati al **Campionamento del suolo planetario;** all'**immagazzinamento e preparazione** dei campioni per le missioni di *Sample Return* (riporto del campione sulla Terra) e alla **Trasmissione *wireless*** per conoscere dall'esterno lo stato del campione sigillato nel contenitore stagno;
- **bracci robotici** dotati di sensori ad elevate prestazioni, coordinati da un sistema intelligente che decide quale campione prelevare e come analizzarlo in loco;
- **Intelligenza Artificiale (I.A.)** che consiste nello sviluppo di tecniche/algoritmi in grado di incrementare e rendere più affidabile l'autonomia dei sistemi conferendo loro la capacità di migliorare le proprie prestazioni principalmente sulla base delle informazioni acquisite;
- i modelli che utilizzano algoritmi di Intelligenza Artificiale, hanno come proprietà comune quella di essere meno influenzabili da disturbi esterni o errori nella misurazione dei parametri in gioco. Apparentemente agiscono in modo che un essere umano definirebbe intelligente. Ad esempio su un test effettuato sia su soggetti umani e sia su programmi basati sull'Intelligenza Artificiale si è determinato che, in media, il soggetto umano sbaglia 7 segnali stradali su mille mentre i sistemi basati su Intelligenza Artificiale riducono il numero di possibili errori su mille immagini acquisite a soli tre. Abbiamo pertanto algoritmi di Intelligenza Artificiale che superano, nella loro specificità di analisi, le capacità umane. Perché questo sia possibile, l'algoritmo deve essere sviluppato per l'applicazione specifica ed istruito opportunamente. Lo sviluppo dell'Intelligenza Artificiale presenta enormi potenzialità tecniche e commerciali. L'Istituto McKinsey ipotizza un investimento mondiale nel settore della I.A. di circa 17 miliardi di dollari per i prossimi anni. Tra i diversi approcci nello sviluppo di tali algoritmi, in ambito spaziale le tecniche del ***Deep Learning*** (DL) sono particolarmente promettenti. Una rete DL è una rete neurale caratterizzata da un elevato numero di livelli stratificati interni alla rete neurale stessa.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Lo sviluppo delle tecnologie robotiche, se fatto in maniera organica e tenendo in considerazione concetti quali flessibilità e modularità, permetterà di acquisire un *background* di conoscenza utilizzabile nelle missioni di esplorazione, dove si prevede l'impiego di sistemi robotici autonomi ed anche in missioni dove è prevista la presenza dell'uomo, opportunamente assistito da sistemi robotici.

Le applicazioni rilevanti dell'I.A. afferiscono alle seguenti aree tematiche:

- incremento della robustezza dell'autonomia di bordo implementando tecniche di logica proposizionale;
- categorizzazione visiva degli oggetti con riconoscimento di oggetti con un'elevata affidabilità tramite il DL.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

L'esplorazione della **Luna** da parte di sistemi robotizzati risale agli anni '60 ed è sempre stata monopolio di Russia e Stati Uniti.

Recentemente l'interesse per la Luna si è ravvivato in ambito internazionale. ESA sta progettando, attraverso un accordo bilaterale con la Russia, una missione (Luna-27 detta anche Luna – *Resurs*) di atterraggio al Polo Sud della Luna, che prevede l'utilizzo di un sistema di perforazione e campionamento del suolo fino alla profondità di un metro, la raccolta e l'analisi dei campioni, allo scopo di trovare la presenza di acqua e altri materiali interessanti per un possibile utilizzo delle risorse lunari. Tale sistema è denominato PROSPECT, di cui Leonardo S.p.A. è il *Prime Contractor*. La trivella di PROSPECT è un'evoluzione della tecnologia utilizzata per ExoMars, con l'aggiunta di importanti sviluppi tecnologici specifici per il tipo di applicazione (*sampling tool*).

Altri studi relativi a missioni lunari sono in corso con l'ESA, relativi all'utilizzo di risorse lunari (ISRU, *In–Situ Resource Utilisation*). Leonardo S.p.A. partecipa come responsabile della parte robotica.

Marte è la frontiera dell'esplorazione robotica: l'ultimo ***Rover* Autonomo** atterrato su Marte è ***Curiosity***, progetto NASA (USA), al pari dei precedenti *Rover* ***Spirit*** e ***Opportunity*** (*Mars Exploration Rovers*), artefice di missioni di grande successo e le cui scoperte sulla potenzialità di Marte ad ospitare forme di vita stanno monopolizzando l'attenzione della comunità scientifica. In Europa, **Beagle2** è stato l'unico tentativo di inviare un'apparecchiatura automatizzata per l'esplorazione di Marte: si prevedeva l'atterraggio di un *Lander* sulla superficie del pianeta.

Il progetto **ExoMars** rappresenta in larga parte lo stato dell'arte in Europa; un **primo lancio (2016)** è già stato effettuato con il raggiungimento di buona parte degli obiettivi prefissati.

Un **secondo lancio (2020)** prevede di portare un secondo *Lander* ed un *Rover* sulla superficie del pianeta con l'obiettivo di trovare tracce di vita, presente o passata. L'Italia è in prima linea nello sviluppo della missione: il *Prime Contractor* di ESA è Thales Alenia Space in Italia, responsabile di tutta la missione, ed italiane sono alcune tecnologie chiave della missione, come ad esempio **la trivella** (realizzata da Leonardo S.p.A.) montata sul *Rover* che sarà in grado di raccogliere campioni del suolo fino a due metri di profondità sotto la superficie di Marte, con uno spettrometro miniaturizzato (Ma MISS, un progetto ASI realizzato da Leonardo) che riesce a riprendere il campione nel sottosuolo prima di prelevarlo. Studi avanzati per la Guida, Navigazione e Controllo e funzioni associate del *Rover* di ExoMars sono in fase di sviluppo in Inghilterra.

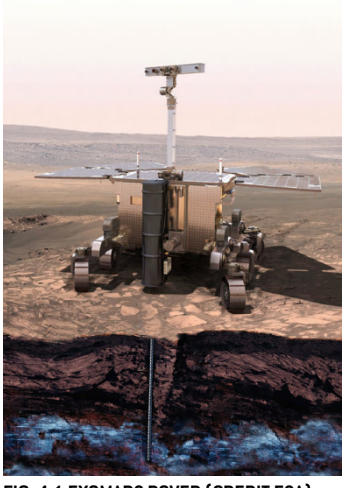


FIG. 4.1 EXOMARS ROVER (CREDIT ESA)

Per quanto riguarda la Manipolazione in **ambiente spaziale**, le applicazioni più mature sono quelle legate alla *International Space Station* ISS (già equipaggiata con un Braccio Robotico "*Canadarm*" prodotto dal Canada, e con un altro prodotto da Europa e Russia "ERA" pronto ad essere lanciato nel prossimo futuro). Molti studi e prototipi sono stati realizzati o sono in via di realizzazione per le applicazioni più "futuristiche", come ad esempio la manutenzione, il *deorbiting* o il rifornimento di satelliti collaborativi e costruzioni di infrastrutture direttamente in

orbita. Un esempio è l'*Eurobot WET Model* sviluppato da Thales Alenia Space in Italia, atto a dimostrare un prototipo di "ragno spaziale" a tre zampe capace di muoversi sulla parte esterna di un Satellite o della Stazione Spaziale Internazionale per effettuare operazioni di manutenzione.

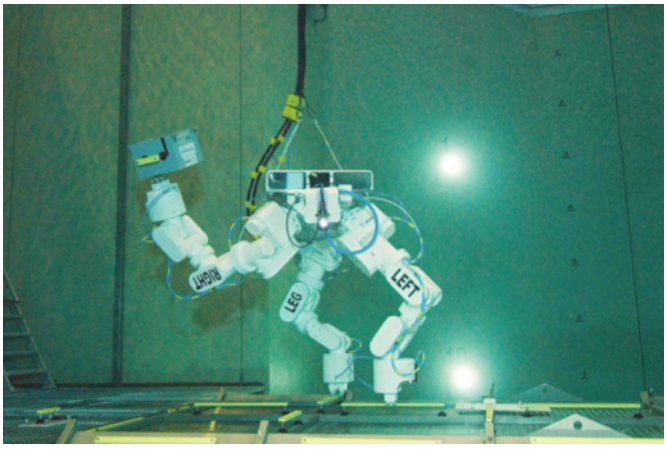


FIG. 4.2 EUROBOT WET MODEL (UNDERWATER OG PROTOTYPE) (CREDIT THALES ALENIA SPACE)

L'industria Italiana Leonardo S.p.A. ha inoltre portato avanti una serie di sviluppi tecnologici per la prototipazione di sistemi di **manipolazione robotica** (bracci manipolatori) in supporto sia all'esplorazione planetaria (per es. DELIAN, di 1 metro di estensione ed una elevata accuratezza di posizionamento), sia in supporto alle operazioni extra-veicolari effettuate dagli astronauti, per esempio DEXARM sulla ISS. I bracci robotici sviluppati per esplorazione planetaria sono utilizzabili anche per la manutenzione di sistemi, inclusi i satelliti.





FIG. 4.3 ROBOTIC ARMS: DELIAN AND DEXARM (CREDIT ESA E LEONARDO SPA)

Una ulteriore considerazione riguarda invece l'impiego di **reti neurali** per il controllo robotico. Le reti neurali si basano su principi differenti rispetto a quelle impiegate nella catalogazione delle immagini. Esse appaiono come un'area di promettente sviluppo da tenere in evidenza nei futuri

piani spaziali poiché l'applicazione del DL troverà nel campo della robotica un sicuro terreno fertile. L'applicazione maggiormente promettente è quella relativa alla **manipolazione degli oggetti** (*grasping objects*). Tramite un opportuno database è stato possibile per il gruppo di ricerca di Pinto e Gupta (Carniege Mellon USA) insegnare ad un sistema robotico Baxter la presa di differenti oggetti senza doversi preoccupare di specificare la traiettoria del braccio robotico e indicare se l'oggetto da prendere sia pesante oppure fragile.
L'ESA ha mostrato un interesse sempre maggiore verso le reti neurali creando anche un sito dedicato ai nuovi studi afferenti all'Intelligenza Artificiale. Le aree di maggiore interesse sono:

- filtraggio e riconoscimento oggetti tramite DL (in particolare *Convolutional Neuronal Networks*). Esempio: il riconoscimento delle nuvole nelle fotografie satellitari in modo da filtrare le immagini automaticamente e uno studio innovativo relativo alle immagini in campo iper spettrale;
- applicazioni visive per rilevazione di oggetti o migliorie nella navigazione autonoma. Come applicazione visiva del DL Thales Alenia Space in Italia ha studiato per la futura missione *Fetching rover*, proseguimento della missione ExoMars, un prototipo in grado di rilevare automaticamente i *sampler* e la loro posizione sul terreno.

Nell'ambito del progetto **STEPS/STEPS2** cofinanziato dalla U.E. sono state sviluppate attività di ricerca per lo sviluppo di tecnologie in collaborazione tra grandi e piccole industrie con le Università/Politecnico di Torino ed hanno interessato vari aspetti connessi alla mobilità di un *rover*, tra queste vanno evidenziate le tecniche di:

- generazione di mappe digitali (DEM) utilizzando vari tipi di sensori (stereo-camere, camere *time-of-flight*). La tecnologia include la tecnica di unione di varie mappe digitali allo scopo di creare una mappa unica dell'area esplorata;
- definizione di un Percorso di Riferimento del *Rover* tenendo in considerazione le implicazioni derivanti dal terreno (crateri, rocce) modellate nelle mappe digitali e le caratteristiche del sistema di locomozione (sterzata, dimensione ruota):
- valutazione della Posizione e dell'Assetto del *Rover* in tempi successivi, tramite il riconoscimento di alcuni parametri di riferimento dell'area esplorata;
- generazione di Algoritmi per il Rilevamento di Assetto e Posizione Relativa tra camera e specifici sistemi di codici (tipo codici a barre). La tecnologia include la tecnica di riconoscimento ed inseguimento di un obiettivo da definire dalla stazione di controllo oppure automaticamente;
- logica di Gestione di Sistemi Autonomi come i *Rover*. Tale architettura gestisce il sistema autonomo assicurando le interfacce con gli elementi fisici di bordo, con i vari moduli S/W, gestendo la comunicazione tra i vari moduli e molte delle funzioni richieste, semplificandone l'implementazione.

Una adeguata attenzione deve essere data allo sviluppo di Laboratori e Metodologie per Verificare i Sistemi Robotici, onde ridurre i rischi della missione.
La verifica di *Rover* si può realizzare in un'apposita area tecnologica con superfici aventi carat-

teristiche (tipologia, morfologia) similari a quelle di Marte o Luna, supportate da un **Centro di Controllo per la Gestione dei Sistemi Autonomi e della Comunicazione**, eventualmente anche con enti esterni. Nell'area tecnologica, si ha la possibilità di verificare alcune basilari prestazioni dei sistemi autonomi *Rover*, tra cui evidenziamo la **capacità di movimentazione**, l'**abilità nell'inseguire specifici oggetti**, la **compatibilità del sistema con l'ambiente circostante** e la **valutazione della loro posizione ed assetto** con il relativo recupero di eventuali errori dovuti alla precisione dei sensori, algoritmi ed altro.

Un laboratorio per la verifica di *Rover* è stato realizzato nell'ambito del progetto STEPS/STEPS2 ed è ubicato presso Thales Alenia Space in Italia, sito di Torino.

Le importanti competenze dell'apparato industriale trovano riscontro negli ambienti universitari, dove conoscenze approfondite nel campo della Meccatronica, cosi come nell'elaborazione di algoritmi, sono presenti a livello di assoluto rilievo. Come esempi indicativi della collaborazione tra Industria e Istituzioni, si evidenziano i programmi co-finanziati: **STRONG** (*Systems Technology and Research National Global Operations*) – nell'ambito del progetto *Space Advanced Project for Excellence in Research and Enterprise* (**SAPERE**) – supportato dal Ministero Italiano della Ricerca ed Università (**MIUR**) e **STEPS/STEPS2** in cui le sinergie tra i diversi attori coinvolti nello studio, hanno permesso di incrementare la conoscenza in molti settori e sviluppare tecnologia.

Molti studi avanzati prototipali sono stati implementati o in via di implementazione. Da sottolineare la collaborazione nell'ambito di progetti Horizon 2020 dell'Unione Europea di innovazione e ricerca nell'ambito della Robotica e Meccatronica.



FIG. 4.4 LABORATORIO PER LA VERIFICA DI ROVER (CREDIT THALES ALENIA SPACE)

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 5

TECNOLOGIE PER IL RIENTRO ATMOSFERICO E L'ESPLORAZIONE

Nell'ambito dei sistemi di trasporto spaziale giocano un ruolo fondamentale alcune tecnologie e discipline, identificate come "abilitanti", quali l'Aerodinamica & Aerotermodinamica, la Guida, Navigazione e Controllo ed i Sistemi di Protezione Termica. La prima fornisce i carichi meccanici e termici cui il veicolo sarà soggetto durante la prima fase dell'ascesa e durante la fase di rientro atmosferico o ingresso in atmosfere di altre pianeti. La seconda rappresenta il vero cervello del sistema rendendone possibile la missione attraverso la sensoristica ad esso asservita che ne fornisce l'*input* e i sistemi di controllo (superfici aerodinamiche, *thrust vectoring, reaction control system*) che fungono da *output*. Infine, i sistemi di protezione termica garantiscono il mantenimento di condizione idonee alla sopravvivenza del sistema stesso, isolandolo dalle severe condizioni esterne dovute all'attraversamento ad altissima velocità (>7km/s) dell'atmosfera.

Aerodinamica, Aerotermodinamica e CFD

L'aerodinamica e l'aerotermodinamica sono da sempre discipline in cui l'Italia ha giocato un ruolo importante sia per la forte eredità aeronautica che per le competenze maturate in campo spaziale.

Le attività in questo settore si possono dividere in numeriche e sperimentali. Dal punto di vista sperimentale, per le tematiche riguardanti il rientro atmosferico e l'ingresso planetario, vanno citate la piccola *facility* SPES (*Selective Production of Exotic Species*) disponibile presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale di Napoli, capace di testare in piccola scala materiali per i sistemi di protezione termica sia in atmosfera terrestre che planetarie. Un'altra importante galleria del vento ipersonica è HEAT (*High Enthalpy Arc-heated Tunnel*) in SITAEL capace di simulare numeri di Mach fino a 9.

Sicuramente bisogna menzionare i Plasma Wind Tunnel del CIRA, SCIROCCO e GHIBLI. Il primo è l'impianto più grande al mondo, con una potenza massima di 70 MW capace di generare un flusso ipersonico ad altissimo contenuto energetico di 2 metri di diametro, per la simulazione aerotermodinamica dei sistemi di protezione termica dei veicoli spaziali. Al suo interno sono stati provati numerosi TPS da diversi attori internazionali (ESA, NASA, ISRO, JAXA, Sierra Nevada Corporation, Ariane Groupe) oltre ai dimostratori sviluppati da CIRA stesso nell'ambito di progetti di ricerca nazionali ed internazionali. GHIBLI invece, con una potenza di 2 MW, è un impianto *arcjet* ipersonico per esperimenti su articoli di prova di piccole dimensioni, particolarmente efficace per la caratterizzazione e selezione di campioni di materiale, lo studio di fenomeni aerotermodinamici, la validazione di codici CFD (*Computational Fluid Dynamics*) e lo sviluppo di tecniche di misura avanzate.

Dal punto di vista numerico anche in questo caso le Università e i Centri di Ricerca italiani hanno sviluppato importanti capacità nella customizzazione di codici commerciali per applicazioni spaziali oltre che una notevole competenza nello sviluppo di codici proprietari. CIRA storicamente ha sviluppato codici CFD proprietari che coprono tutti i regimi di moto dal subsonico all'ipersonico (ZEN, SIMBA, H2NS, H3NS) ampiamente validati con confronti numerici e sperimentali. In tal senso bisogna ricordare il programma CAST finanziato dall'ASI finalizzato alla realizzazione e validazione di un *software* particolarmente evoluto per la simulazione di flussi in non equilibrio cinetico per applicazioni aerospaziali. A tale attività, guidata dal CIRA, hanno contribuito numerose realtà della ricerca nazionale come CNR e Università (Bari, Bologna, Napoli, Roma, Torino) e del mondo industriale come ALTA, ELV e Thales Alenia Space in Italia. In Figura 5.1 è riportato un esempio di simulazione numerica del campo aerodinamico generato dal veicolo IXV ad una velocità pari a 25 volte quella del suono.

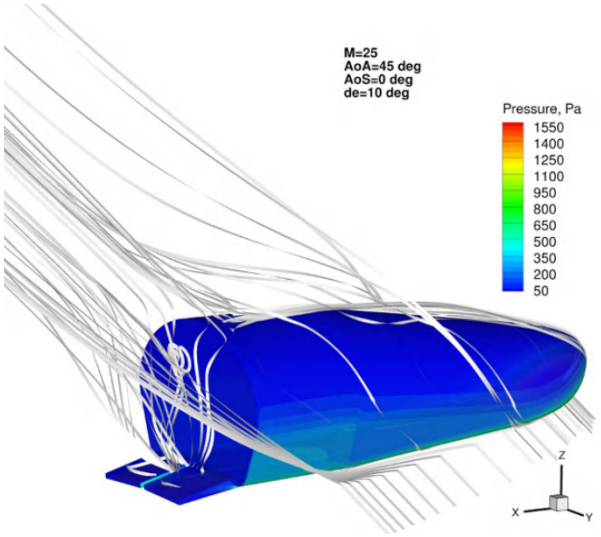
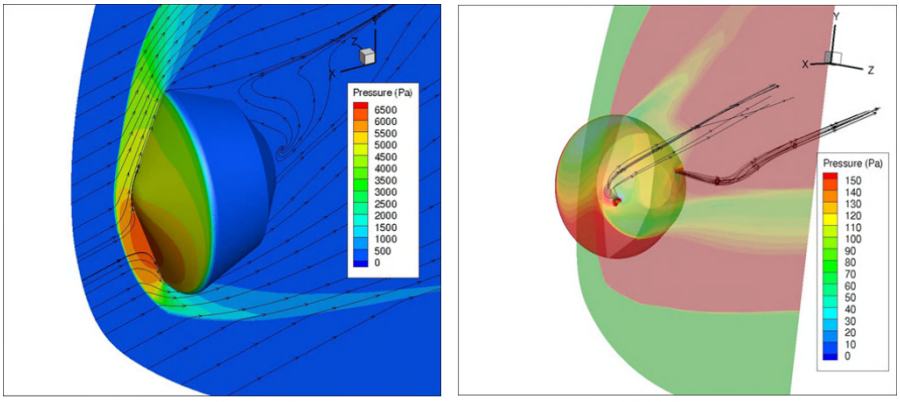


FIG. 5.1 IXV SIMULAZIONI CFD (CREDIT ESA)

Negli ultimi anni, nell'ambito dei programmi PRORA e HYPROB, ulteriori sviluppi sono stati effettuati dal CIRA sul codice di aerotermodinamica al fine di generalizzare la modellistica cinetica. La versione più recente di tale codice, denominata NExT, è in grado di simulare anche l'ingresso in atmosfere diverse da quella terrestre, nonché camere di combustione di motori a razzo a propellente liquido o ibrido. In Figura 5.2 un esempio di ricostruzione numerica eseguita dal CIRA di un test in galleria di una capsula per ingresso su Marte studiata nell'ambito del progetto Marsget (ESA).



RCS OFF RCS ON

FIG. 5.2 SIMULAZIONE CFD DEGLI EFFETTI DEI PROPULSORI PER IL CONTROLLO DI ASSETTO SUL CAMPO AERODINAMICO DI UN CAPSULA (CREDIT THALES ALENIA SPACE/CIRA).

A complemento del panorama dei codici di CFD applicata e finalizzata alla simulazione di flussi in non equilibrio termo-chimico è da citare lo sviluppo del codice proprietario Thales Alenia Space in Italia denominato ANASTASIA. Finanziato interamente da Thales Alenia Space in Italia per la parte termo-fluidodinamica, ha costituito la base per l'implementazione e lo sviluppo di un codice integrato (simulazione fenomeni di ablazione e risposta termica materiale accoppiata), con il finanziamento del progetto di ricerca STEPS / STEPS2 della Regione Piemonte, che ha visto il contributo di realtà regionali PMI (*Optimad Engineering, Exemplar Solutions*) e del Dipartimento DIMEAS del Politecnico di Torino. Tale approccio è stato seguito nell'ottica di sviluppare una più ampia metodologia di ottimizzazione integrata di progettazione, analisi e simulazione multi-disciplinare. Il livello di maturità tecnologica allo stato attuale (TRL 4/5) sarà esteso al livello TRL 7 avvalendosi delle misure effettuate in volo e dell'opportunità delle attività di analisi di correlazione post-volo della missione IXV.

Sistemi di Guida, Navigazione e Controllo

Dal punto di vista dei sistemi di GNC (Guida, Navigazione e Controllo), i voli dei due velivoli Castore e Polluce nell'ambito del programma aerospaziale nazionale USV-1 ha permesso al CIRA di evidenziare la sua notevole capacità in tale ambito. In particolare gli algoritmi implementati hanno consentito il controllo della missione dallo sgancio da pallone avvenuto a circa 30km fino al raggiungimento di Mach 1.23 (nella seconda missione) con manovre in volo fino alla simulazione di una manovra di atterraggio. Il CIRA sta proseguendo gli sviluppi tecnologici nell'ambito del programma aerospaziale nazionale PRORA e, grazie alla partecipazione al programma *Hexafly* finanziato da ESA e Comunità Europea, dimostrerà le capacità dei propri algoritmi durante il volo ipersonico del dimostratore fino a Mach 8. Va segnalata, inoltre, l'esperienza maturata nell'ambito del programma FPSA con il contributo del CIRA nello sviluppo degli algoritmi per il sistema propulsivo per il controllo di assetto (RACS) del lanciatore VEGA, in considerazione dell'importanza dell'utilizzo degli RCS durante le prime fasi del rientro atmosferico. Degna di nota è anche l'esperienza matu-

rata nell'ambito della navigazione orbitale (progetto VINAG) in relazione allo sviluppo di sistemi di navigazione ibrida (integrazione di ricevitore GNSS, *Star Tracker* e sensori inerziali) fondamentali per la fase di *de-orbiting* e rientro vero e proprio. Le esperienze maturate di cui sopra hanno permesso la partecipazione corrente alla fase A/B1 del progetto ESA *Space Rider* che, dal punto di vista del GNC, vede il CIRA impegnato da un lato nello sviluppo di un algoritmo del sistema di navigazione per la fase orbitale (e *de-orbiting*) e dall'altro come fornitore del sistema (*Hardware* e *Software*) e del relativo servizio per la validazione delle tecnologie di rientro GNC sviluppate per l'atterraggio con *parafoil*.

Protezioni termiche e Strutture

Per quanto riguarda le tecnologie, uno degli aspetti più critici del trasporto spaziale riguarda i sistemi di protezione termica che, durante le fasi di volo ad elevatissima velocità, devono resistere a sollecitazioni termiche e meccaniche estreme, causate dall'interazione con l'atmosfera. Altrettanto importanti sono le strutture primarie cui si richiede sempre più efficienza strutturale con la riduzione dei pesi nell'ottica di una sempre più spinta massimizzazione dei *payloads* e riduzione dei costi di accesso allo spazio.

In funzione della configurazione aerodinamica del velivolo da rientro e del suo profilo di missione varia di molto la tipologia di protezione termica che è necessario adottare per garantire l'integrità del velivolo stesso durante la fase di rientro in atmosfera. Nei rientri veloci, che prevedono quindi la dissipazione dell'energia cinetica per attrito con l'atmosfera in un breve lasso di tempo (ad es. rientri balistici), gli scudi termici sono investiti da notevoli flussi di calore, anche se per tempi ridotti: per sostenere le elevatissime temperature tipiche di questa tipologia di rientro è necessario dotare il velivolo di scudi termici ablativi.

I materiali ablativi garantiscono l'isolamento termico andando incontro, se sollecitati da elevati flussi termici, ad una serie di trasformazioni chimico-fisiche (pirolisi, *outgassing*, ablazione, ecc.) che permettono lo smaltimento di parte del carico termico.

Di particolare interesse sono in questo ambito i materiali ablativi a bassa densità costituiti da substrati fibrosi ceramici parzialmente impregnati con matrici polimeriche: esempio ne sono i materiali carbon/fenolici che a fronte di una ridottissima densità, che può essere anche inferiore ai 250 kg/m3, riescono a sostenere efficientemente flussi termici molto elevati, anche maggiori di 10 MW/m2.

Gli scudi termici ablativi, degradandosi durante il rientro, non sono riutilizzabili e devono essere sostituiti o ripristinati ad ogni missione.

Lo sviluppo di materiali ablativi per alti e bassi flussi termici vede un discreto numero di attori, sia industriali che accademici, coinvolti sul territorio nazionale. In particolare importanti test di qualifica in Plasma Wind Tunnel sono stati condotti all'interno di programmi ESA su ablativi carbon/fenolici (Figura 5.3) a bassa densità nati dalla collaborazione tra l'Università di Roma La Sapienza e Thales Alenia Space in Italia. Inoltre, sempre maggiore è lo sguardo orientato verso le nanotecnologie, che hanno le potenzialità per incrementare enormemente le prestazioni di questa classe di materiali. In particolare lo sviluppo di materiali ablativi nanocompositi ha dimostrato essere molto promettente, portando a miglioramenti nelle performance di protezione termica sia in test di labo-

ratorio che in Plasma Wind Tunnel. L'utilizzo di matrici rinforzate (Figura 5.4) con nanoparticelle ceramiche permette, ad esempio, di ridurre significativamente sia la velocità di ablazione che la conducibilità termica dello scudo termico ablativo.



FIG. 5.3 CAMPIONE IN MATERIALE ABLATIVO TESTATO NELL'IMPIANTO PWT SCIROCCO (CREDIT CIRA)

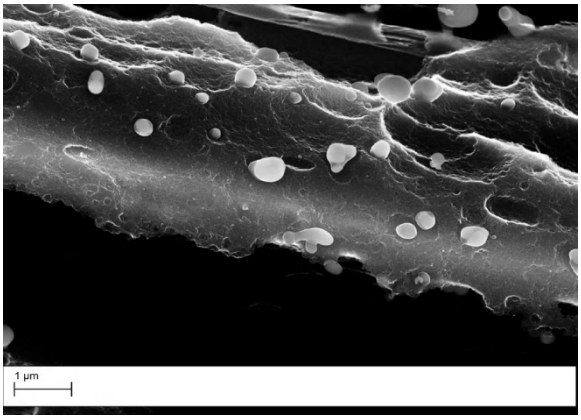


FIG. 5.4 NANOPARTICELLE DISPERSE NELLA MATRICE DI UN MATERIALE ABLATIVO (CREDIT DIP. INGEGNERIA CHIMICA, MATERIALI AMBIENTE, UNIVERSITÀ LA SAPIENZA DI ROMA).

Nei rientri nei quali le superfici aerodinamiche sviluppano portanza e permettono una certa manovrabilità del velivolo (ad es. IXV), l'attraversamento della atmosfera può avvenire in maniera maggiormente controllata, smaltendo l'energia cinetica in tempi più lunghi e garantendo in tal modo flussi termici (e conseguentemente temperature) inferiori. In questi casi è possibile prevedere l'utilizzo di sistemi di protezione termica di tipo "riutilizzabile", generalmente realizzati in materiali compositi a matrice ceramica (CMC).
Nel breve termine, sono particolarmente importanti i materiali basati su compositi a matrice ceramica (CMC), ed in particolare:

- Compositi C/C (fibre di carbonio, matrice carbonio) che trova una applicazione strategica per

l'industria aerospaziale italiana come costituente degli inserti di gola di ugelli per propulsori a propellente solido di elevate prestazioni;
- Compositi C/SiC e SiC/SiC (fibre in carbonio o carburo di silicio, matrice carburo di silicio) entrambe componenti essenziali di protezioni termiche per veicoli spaziali e per stabilizzatori di fiamma in propulsori *airbreathing* (che utilizzano l'aria atmosferica come comburente).

La collaborazione tra il CIRA e PETROCERAMICS, azienda italiana del Kilometro Rosso partecipata del gruppo industriale Brembo, ha dato luogo nel corso degli ultimi anni ad eccellenti risultati nel campo dei compositi C/SiC.
Forti dell'esperienza nella realizzazione di compositi a fibra lunga per applicazioni aerospaziali e delle tecniche di infiltrazione da silicio liquido del settore automobilistico di alta gamma, CIRA e PETROCERAMICS hanno sviluppato un composito ceramico rinforzato, denominato ISiComp, completamente nuovo e che può essere prodotto con un ciclo di manifattura rapido ed economico.
Il processo messo a punto si articola su quattro fasi:

1. la realizzazione di una preforma della geometria del componente da realizzare ottenuta per laminazione di un tessuto di fibre di carbonio impregnate con resina fenolica;
2. la pirolisi della preforma, un trattamento termico a temperature molto elevate in atmosfera controllata che distrugge la matrice polimerica conservandone il solo carbonio;
3. l'infiltrazione nella preforma di silicio in fase liquida che reagendo con il carbonio genera una matrice di Carburo di Silicio;
4. la deposizione di un *coating* superficiale per la protezione delle fibre dai fenomeni ossidativi particolarmente critici durante la fase di rientro in atmosfera.

Una prima verifica dell'applicabilità della tecnologia sviluppata alla realizzazione di sistemi di protezione termica si è ottenuta con il test in SCIROCCO (Figura 5.5) di un dimostratore di una superficie di controllo, delle dimensioni di circa 400mm x 300mm, esposto per 10 minuti ad un flusso ipersonico ad alta entalpia rappresentativo delle condizioni di rientro da orbita bassa terrestre. Il componente ha raggiunto temperature superiori 1.200°C senza mostrare segni di degrado.
Sviluppata inizialmente nell'ambito del Progetto PRO.RA. SHS, la tecnologia viene ora applicata al veicolo di rientro *Space Rider* dell'ESA, in particolare alla realizzazione delle superfici di controllo mobili situate nella parte posteriore del veicolo che assicurano il controllo aerodinamico dell'assetto durante la fase di guida autonoma.
La verifica delle caratteristiche di riutilizzabilità del materiale ceramico ISiComp (Figura 5.6) è stata effettuata sottoponendo due dischi di materiale ciascuno a sei cicli di esposizione al plasma, corrispondenti all'inviluppo di missioni previsto per l'intera vita operativa del veicolo *Space Rider*. Per ognuno dei cicli il materiale è stato sottoposto ad un flusso ipersonico ad alta entalpia avente una velocità di circa 14.000 km/h in grado di generare una temperatura superficiale di 1.250 °C per un tempo di circa 12 minuti. Ognuno dei campioni di materiale è stato esposto al plasma per un tempo totale di circa 70 minuti. L'analisi dei campioni sottoposti ai test ha convalidato l'eccellente comportamento del materiale che non ha subito alcuna modifica né in termini di peso né in termini di caratteristiche meccaniche.



FIG. 5.5 DIMOSTRATORE TECNOLOGICO I SICOMP NELLA CAMERA DI PROVA DI SCIROCCO (CREDIT CIRA)

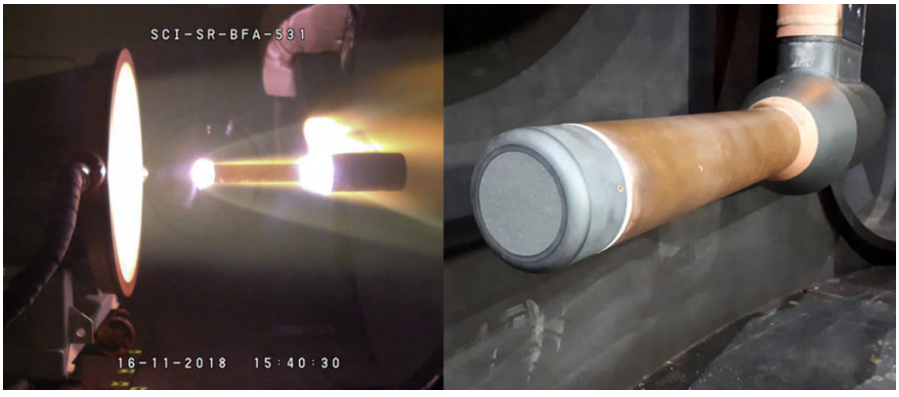


FIG. 5.6 CAMPIONE DI ISICOMP ESPOSTO AL FLUSSO IPERSONICO NELLA GALLERIA SCIROCCO (CREDIT CIRA)

In Figura 5.7 è riportata una vista di assieme del sottosistema *Body Flap* di *Space Rider*. Oltre alle parti ceramiche, il CIRA realizza le strutture di supporto in titanio mediante *Electron Beam Melting*, una specifica tecnica di *Additive Layer Manufacturing* capace di garantire ottime caratteristiche meccaniche ai manufatti. La fase di sviluppo, attualmente in corso, prevede l'effettuazione di numerose campagne di test presso gli impianti del CIRA, sia per la caratterizzazione del materiale rispetto all'ambiente tipico della missione, ivi inclusa la fase orbitale, che per la validazione del *design* rispetto ai carici termomeccanici attesi attraverso test dinamici e statici.

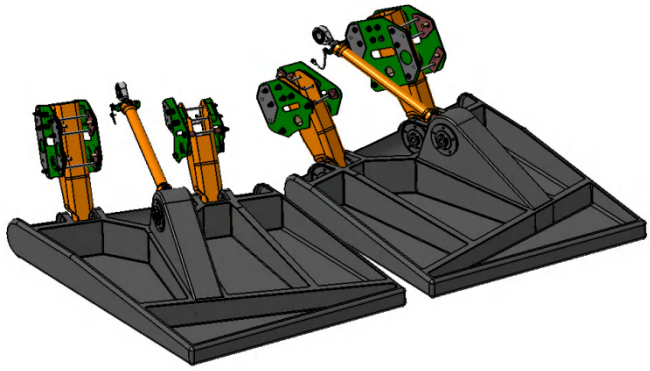


FIG. 5.7 SOTTOSISTEMA SUPERFICI DI CONTROLLO SPACE RIDER (CREDIT CIRA/THALES ALENIA SPACE IN ITALIA)

Un'ulteriore classe di materiali ceramici, adatta all'uso in applicazioni ad altissima temperatura, sono i cosiddetti UHTC (*Ultra High Temperature Ceramics*) i quali risultano essere, grazie alle buone proprietà meccaniche, all'alto punto di fusione ed all'ottima resistenza all'ossidazione, dei candidati ideali per le protezioni termiche di nuova generazione.
Tali materiali sono potenzialmente applicabili per la realizzazione di geometrie aerodinamicamente più efficienti (ad es. bordi d'attacco alari e *nose* aguzzi) che permettono un netto miglioramento delle prestazioni durante la fase di volo transatmosferico dei veicoli spaziali.
Lo sviluppo di materiali ceramici UHTC vede l'Italia come un punto di riferimento nel panorama europeo grazie alla pluralità di attori coinvolti (ISTEC-CNR, Rina Consulting – Centro Sviluppo Materiali S.p.A., CIRA e Università); tuttavia l'estrema fragilità (bassa tenacità) di questi materiali ne ha limitato lo sviluppo e l'utilizzo e ha fortemente spinto verso il loro utilizzo come *coating* di substarti metallici o ceramici ovvero verso lo sviluppo di compositi ceramici con matrici UHTC tenacizzate e fibro-rinforzate, i cosiddetti UHTCMC (Figura 5.8), ambito nel quale sono possibili molteplici possibilità di sviluppo tecnologico.
Nel settore dei sistemi di protezione termica, l'Italia sta sviluppando alcune tecnologie di punta nel campo dei materiali ceramici. Una costante collaborazione e coordinazione tra diversi enti nazionali ha portato allo sviluppo di numerosi componenti che sono stati testati sia al suolo, nelle galleria al plasma disponibili al CIRA (SCIROCCO e GHIBLI), che in reali condizioni di volo su razzi sonda.



(A)



(B)

FIG. 5.8 UN CAMPIONE METALLICO RIVESTITO IN UHTC DIVERSI ESEMPLARI RIVESTITI (A). UN PROTOTIPO IN SCALA REALE DI NOSE CON ESTREMITÀ IN UHTC (B).
(CREDIT CIRA)

Nel passato, la collaborazione tra il CIRA, l'Istituto di Scienza e Tecnologia dei Materiali Ceramici (CNR-ISTEC) considerato un riferimento a livello mondiale nella progettazione e realizzazione di materiali UHTC ed a RINA Consulting - Centro Sviluppo Materiali Spa (CSM) con il notevole *know-how* nella termo spruzzatura con torcia al plasma ed il supporto delle Università "La Sapienza" di Roma e "Federico II" di Napoli sono state svolte numerose attività di ricerca e sviluppo con risultati riconosciuti dalla comunità scientifica internazionale.

Oltre al gran numero di test condotti negli impianti di prova sono stati realizzati diversi prototipi per test in reali condizioni di volo. Nell'ambito del progetto europeo *EXPErimental Reentry Testbed* (EXPERT), gestito da Thales Alenia Space in Italia (Figura 5.9) come *prime* industriale per il sistema e l'integrazione, CIRA ha contribuito alla realizzazione della capsula spaziale come coordinatore degli esperimenti scientifici, nei calcoli aero-termodinamici e con diversi esperimenti tra cui una coppia di alette in materiale ceramico avanzato.

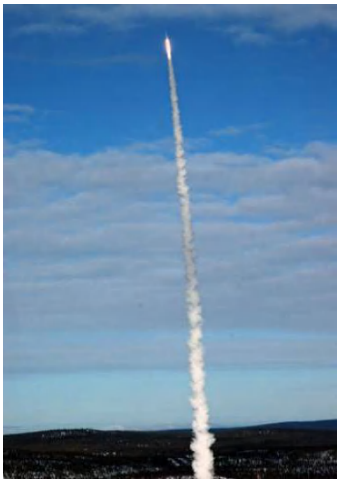
Con la Capsula SHARK (Figura 5.10), lanciata nel 2010 dal razzo sonda europeo MAXUS-8, CIRA non solo ha testato in volo un altro campione di materiale ceramico, ma ha anche aperto una nuova strada per la sperimentazione nel campo del rientro, realizzando per la prima volta una capsula che, sganciandosi dal razzo MAXUS, esegue una missione autonoma di rientro. A dimostrazione del successo di SHARK, il prossimo vettore MAXUS-9 trasporterà una capsula del tutto simile a SHARK per il test in volo di un paracadute per il rientro in atmosfera. Più recentemente, nel 2013,

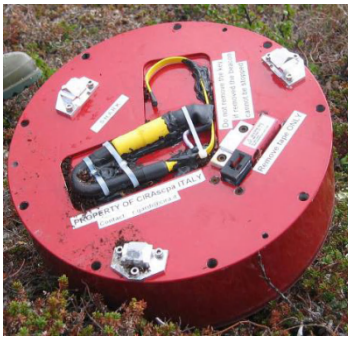
CIRA ha realizzato un'altra coppia di alette, composte sia di materiali ceramici sia di parti metalliche rivestite in ceramico, per il volo del razzo sonda australiano SCRAMSPACE (Figura 5.11), lanciato dalla base europea di Andooya in Norvegia.



FIG. 5.9 CAPSULA EXPERT DURANTE L'INTEGRAZIONE E I TEST FINALI (CREDIT THALES ALENIA SPACE IN ITALIA)







(A) **(B)** **(C)**

FIG. 5.10 ASSEMBLAGGIO DELLA CAPSULA SHARK ULTIMATO AL CIRA E INTEGRATO SUL LANCIATORE (A) LANCIO DALLA BASE ESRANGE (B) RECUPERO (C). (CREDIT CIRA)



FIGURA 5.11 - SCRAMSPACE WINGLETS ASSEMBLATO AL CIRA E INTEGRATO SUL VEICOLO DI LANCIO (CREDIT CIRA)

Negli ultimi anni i risultati ottenuti sui rivestimenti UHTC termospruzzati hanno suscitato l'interesse del Ministero della Difesa Italiano e del Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti, che hanno avviato una proficua attività di ricerca tra il CIRA e l'Air Force Research Laboratory americana (AFRL) su *coating* in UHTC su substrati in CMC (Figura 5.12). In parallelo, CIRA ha continuato a portare avanti la tecnologia del *coating* termospruzzato con RC-CSM su materiali metallici. In entrambe le attività sono stati realizzati campioni in piccola e larga scala.



FIG. 5.12 CAMPIONI DI PICCOLA SCALA DI SUBSTRATI IN CMC CON RIVESTIMENTO IN UHTC (CREDIT CIRA)



FIG. 5.13 DIMOSTRATORI LARGA SCALA DI TERMOSPRUZZATURA DI RIVESTIMENTI IN UHTC SU SUBSTRATI CM (CREDIT CIRA)

Per quanto riguarda gli UHTCMC (Figura 5.13), ISTEC-CNR è attualmente capofila del progetto H2020 CHARME[3] che vede coinvolti anche l'Università di Napoli Federico II e AVIO come *partner* italiani e tra i *partner* stranieri spiccano il DLR e Ariane Groupe. L'obiettivo è di innalzare il TRL di tale tecnologia per applicazione ai sistemi di protezione termica e per la propulsione. Anche il CIRA è stato recentemente coinvolto per le attività di *testing* in GHIBLI su piccoli campioni di UHTCMC realizzati da ISTEC-CNR nell'ambito di un progetto finanziato dal Ministero degli Affari

Esteri e della Cooperazione Internazionale in collaborazione con l'Università di Boulder – Colorado (USA).

Strutture avanzate

Per incrementare il *payload* di sistemi di rientro atmosferico occorre diminuire, possibilmente a parità di costo, il peso delle strutture primarie, intervenendo sui materiali, sui concetti strutturali e sui processi realizzativi.

L'introduzione dei materiali compositi (*Carbon Fiber Reinforced Plastics*, CFRP) nelle strutture primarie aerospaziali ha generato un vero cambio di paradigma tecnologico rispetto all'uso del metallo, in termini progettuali e realizzativi, che solo oggi sta raggiungendo una piena maturità. Il CFRP non appare, fra l'altro, ad oggi sostituibile, almeno nel medio periodo, con ulteriori innovazioni radicali in termini di materiale.

Tuttavia va sottolineato che sebbene il risparmio di peso, rispetto all'alluminio, teoricamente atteso dall'uso del CFRP possa raggiungere il 60%, ad oggi non sono stati ancora messi a punto concetti strutturali e metodi realizzativi in grado di sfruttare al meglio tali prerogative. Il miglioramento delle prestazioni reali tipicamente si limita ad un 15% circa di risparmio di peso ma con costi maggiori.

In questa fase di maturazione tecnologica nell'uso del CFRP, si inseriscono pienamente gli sviluppi, in particolare al CIRA, sulle strutture reticolari, genericamente classificate come "*Grid*", sia per i lanciatori, sia per le strutture satellitari, ma anche per i velivoli di rientro.

Tali strutture sono costituite da un reticolo di costolature (*ribs*) elicoidali e circonferenziali in composito unidirezionale, eventualmente integrate con uno *skin* esterno. Ottimizzando la geometria locale ripetitiva di tali strutture in funzione della forma generale e dei carichi, e combinando con essa una opportuna scelta delle fibre e delle resine, nonché del processo realizzativo, si riescono ad ottenere, in casi tipici, risparmi reali di peso di circa il 40% rispetto al metallo.

Al CIRA sono stati sviluppati negli ultimi anni sia metodi per l'ottimizzazione strutturale che processi innovativi, basati su tecniche di avvolgimento parallelo robotizzato di fibre secche e infusione liquida.

Questi metodi sono stati applicati con successo in particolare nella progettazione e realizzazione prima, di un modello scalato dell'interstadio 2/3 di VEGA con un finanziamento ASI, poi dell'interstadio 2/3 del lanciatore VEGA-C il cui volo è atteso nel 2020, in collaborazione con AVIO (Figura 5.14).

Inoltre, finanziato da ESA nell'ambito della piattaforma ARTES TA, è in corso la dimostrazione tecnologica per la progettazione e realizzazione di un *Central Tube* tipico satellitare, il cui test è previsto entro il 2019 (Figura 5.15). Ancora finanziato da ESA, nello stesso ambito ARTES, è in corso lo sviluppo tecnologico di un boom tipico per antenna satellitare di grandi dimensioni di tipo dispiegabile. È stato già realizzato un dimostratore di 1,5 metri che sarà testato entro il 2019 e sono in corso studi per l'estensione a dimensioni di 12 metri di lunghezza (Figura 5.16).

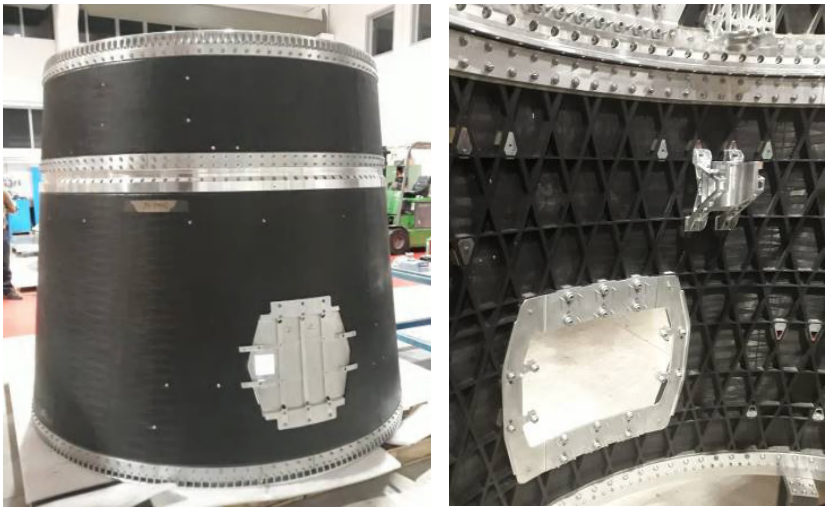


FIG. 5.14 MODELLO DI QUALIFICA DELL'INTERSTADIO 2/3 DEL LANCIATORE VEGA-C (GIUSTO ET AL., PROCEEDINGS OF 12TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPOSITE SCIENCE AND TECHNOLOGY, 8-10 MAGGIO 2019.) (CREDIT CIRA /AVIO)



FIG. 5.15 DIMOSTRATORE TECNOLOGICO DI UN "CENTRAL TUBE" SATELLITARE (CREDIT CIRA/ESA)

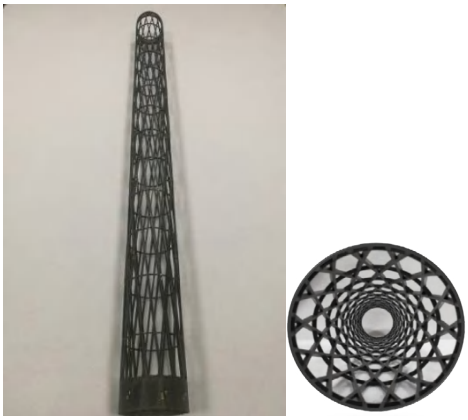


FIG. 5.16 – DIMOSTRATORE DI UN BOOM PER UN'ANTENNA DISPIEGABILE (CREDIT CIRA/ESA)

Nell'ambito del programma PRORA, progetto ICCS (*Innovative Cold Composite Structure*) al CIRA sono in corso studi per la progettazione ottimizzata e la realizzazione di una fusoliera di velivolo di rientro innovativa di tipo "*grid*", integrata con protezioni termiche esterne e *attachment* interni (Figura 5.17).

Gli studi consentiranno di estendere a forme non assialsimmetriche con geometrie anche a doppia curvatura gli stessi concetti applicati, con successo, nei casi illustrati sopra. Ad oggi tali studi mostrano, nel *test case* preso in considerazione, che la struttura "*grid*" è potenzialmente più effi-

ciente rispetto alle tipiche strutture *sandwich* in CFRP, con margini di miglioramento rispetto ad esse del 20%, ovvero di circa il 35% rispetto al metallo.

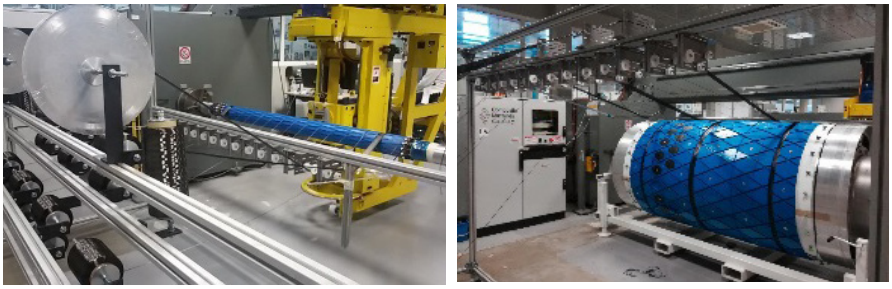


FIG. 5.17 TECNICA BREVETTATA DA CIRA PER INTERLACCIARE GLI IRRIGIDIMENTI ELICOIDALI E CIRCONFERENZIALI. (CREDIT CIRA)

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

L'attuale visione strategica, disegnata dall'Agenzia Spaziale Europea e Nazionale, punta a sviluppare e consolidare le iniziative di ricerca sui sistemi di trasporto spaziale quali lanciatori, satelliti e veicoli di rientro traguardando:

1. il consolidamento della capacità sistemistica e tecnologica della *leadership* europea nello sviluppo dei lanciatori;
2. il rafforzamento del ruolo di primo piano nei sistemi, tecnologie e dimostratori di rientro in atmosfera terrestre e in quella di altri pianeti del sistema solare;
3. lo sfruttamento delle orbite terrestri e l'esplorazione dello Spazio.

Tali obiettivi sono stati perseguiti nel corso degli anni tramite la partecipazione italiana ai programmi ESA di sviluppo dei lanciatori della famiglia europea e dei veicoli di rientro. Nel corso dell'ultima Conferenza Interministeriale degli Stati Membri dell'ESA, tenutasi a Lucerna nel dicembre 2016, sono stati confermati gli impegni dell'Italia quale nazione *leader* nello sviluppo del VEGA-C, evoluzione dell'attuale sistema di lancio VEGA, e del programma *Space Rider* per lo sviluppo di un veicolo di rientro atmosferico con capacità di atterraggio, che raccoglie l'esperienza della missione IXV e proietta le competenze nazionali verso un nuovo traguardo.
In ambito *Exploration* e Rientro sugli altri pianeti, nello stesso Consiglio Ministeriale dell'ESA, sono state disegnate le linee di indirizzo degli Stati Partecipanti i quali hanno deciso di prevedere, a partire dal 2017, una evoluzione del programma ISS *Exploitation* al fine di comprendere anche le attività ESA di esplorazione umana dello Spazio oltre l'orbita bassa, ed in particolare di esplorazione lunare oltre che, nell'ambito del programma *European Space Exploration Programme* – Aurora, con il progetto ExoMars, lo sviluppo di capacità autonoma europea di eseguire un atterraggio controllato sulla superficie marziana, operare sul suolo marziano in mobilità di superficie, accedere al sottosuolo per prelevarne campioni e analizzarli *in situ*. Inoltre, è da sottolineare una attenzione particolare verso le missioni di capsule automatiche di "*sample return*" dalla Luna (ad es. *Lunar*

Polar sample return) e da Phobos (*Mars moons sample return*) nell'ambito di future missioni ESA, autonome e/o in collaborazione con JPL/NASA.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Attraverso la partecipazione a progetti internazionali e nazionali (ad es. PRORA - Programma di Ricerca Aerospaziale), l'Italia è riuscita nell'ultimo decennio a consolidare le sue capacità nel trasporto spaziale e nei sistemi di rientro e relative tecnologie attraverso i progetti di seguito descritti brevemente.

Space Rider (Figura 5.18)**,** evoluzione naturale di IXV, finanziato e coordinato dall'ESA ha come obiettivo lo sviluppo di un sistema di rientro atmosferico riutilizzabile capace di garantire operatività, in orbita bassa, a carichi utili per missioni e sperimentazioni in ambito scientifico, robotico, esplorazione, osservazione della Terra e microgravità. La caratteristica di riutilizzabilità e i tempi ridotti di riconfigurazione e approntamento alla nuova missione garantiranno all'Europa un accesso e ritorno dallo Spazio pressoché routinario.

La progettazione e la realizzazione di questo sistema operativo avanzato sono state affidate da ESA ad un *team* industriale composto dalle principali aziende e centri di ricerca spaziali europei e guidato da Thales Alenia Space in Italia e AVIO.

Il veicolo spaziale *Space Rider* sarà lanciato dal lanciatore VEGA-C in un'orbita a 6,2 gradi di inclinazione rispetto all'equatore, e potrà trasportare un carico utile superiore a 600kg di massa. A seguito dell'inserzione in orbita circolare a 440 km di altitudine, l'ultimo stadio, l'AVUM, del lanciatore VEGA, resterà attaccato al modulo di rientro di *Space Rider* con la funzione di modulo di servizio. Seguirà quindi una fase della durata di qualche ora in cui saranno effettuate le operazioni di messa in funzione del sistema dedicate all'apertura dei pannelli solari, la precisa determinazione dell'orbita e dell'assetto orbitale del veicolo e l'attivazione dei carichi utili a bordo.

La missione di riferimento (Figura 5.19), prevede un periodo di 2 mesi di permanenza in orbita, durante i quali saranno effettuati gli esperimenti di microgravità e, a seguire, l'attivazione delle procedure di dimostrazione e validazione delle tecnologie relative ai carichi utili di Osservazione e Scienza della Terra, delle Telecomunicazioni, dell'Esplorazione e di alcune specifiche tecnologie del rientro. Durante tale periodo di sperimentazione saranno effettuate manovre adeguate al mantenimento dell'orbita tale da assicurare le condizioni ambientali richieste dagli esperimenti.

Al completamento della missione orbitale, il sistema *Space Rider* effettuerà le necessarie verifiche, temporale e spaziale per l'abbassamento dell'orbita identificando la migliore opportunità di rientro quando il piano orbitale intersecherà la zona del sito di atterraggio con una accuratezza inferiore a 300km e che il modulo di rientro correggerà sfruttando le sue capacità di manovra laterale.

Il modulo AVUM effettuerà le manovre di abbassamento dell'orbita di *Space Rider* inserendo il modulo di rientro sulla corretta traiettoria di ritorno e dopo essersene separato effettuerà una manovra di ulteriore abbassamento della sua orbita che lo porterà a distruggersi nell'atmosfera.

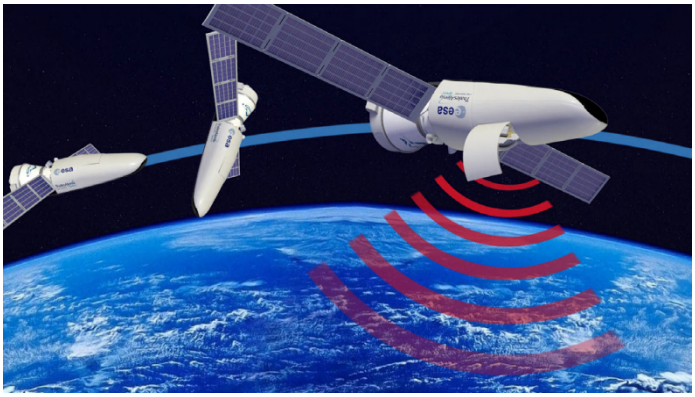
Il modulo di rientro dissiperà gradualmente la sua alta energia cinetica volando per circa 8.000km sulla sua traiettoria di rientro controllata nell'atmosfera.

A circa 15km di distanza dal sito di atterraggio e a 16km di quota, sarà attivata l'apertura del pri-

mo paracadute stabilizzatore, che rallenterà il veicolo fino ad una velocità compatibile per l'apertura di un "*parafoil*". Quest'ultimo, grazie alle sue caratteristiche di portanza, permetterà di volare verso il sito di discesa con una precisione di atterraggio entro un cerchio di 300m. Dopo l'atterraggio, il propellente residuo sarà neutralizzato, i carichi utili rimossi ed il veicolo trasportato al sito di reintegrazione per il ripristino della configurazione e delle sue funzioni per approntarlo al lancio successivo.



(A)



(B)

FIG. 5.18 SPACE RIDER, CONFIGURAZIONE (A), MISSIONE TIPICA (B) (CREDIT THALES ALENIA SPACE IN ITALIA/AVIO/ESA)

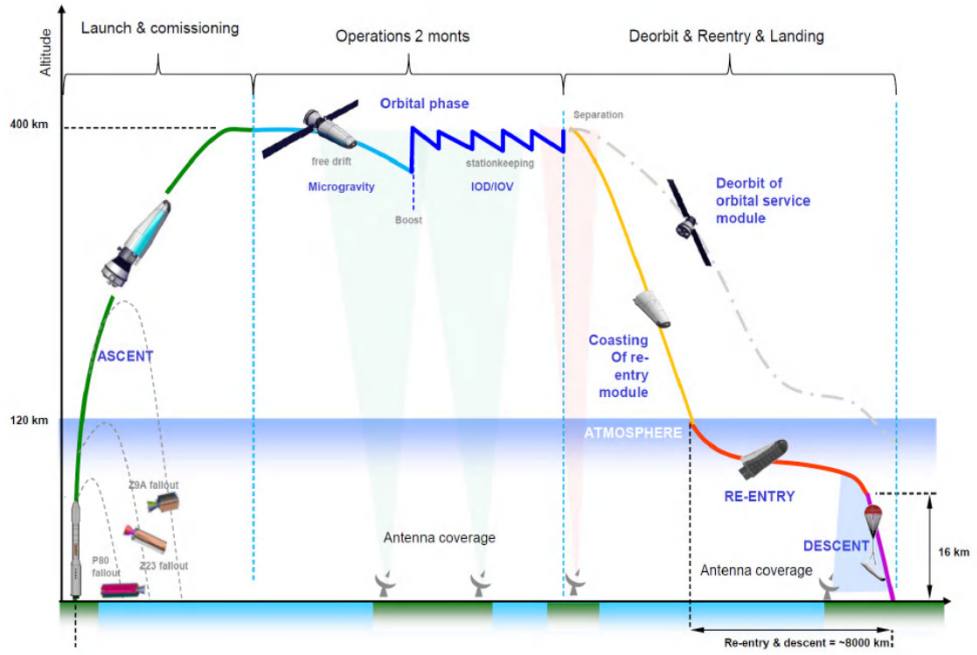


FIG. 5.19 SPACE RIDER, PROFILO DI MISSIONE (CREDIT THALES ALENIA SPACE IN ITALIA)

IXV, *Intermediate eXperimental Vehicle*, finanziato e coordinato dall'ESA, ha come obiettivo lo sviluppo di tecnologie abilitanti per il rientro atmosferico, attraverso la realizzazione di un veicolo spaziale di tipo sperimentale capace di rientrare, in modo autonomo, da orbita bassa eseguendo dei test in volo. La progettazione e la realizzazione di questo dimostratore tecnologico sono state affidate da ESA ad un *team* industriale composto dalle principali aziende e centri di ricerca spaziali europei e guidato da Thales Alenia Space in Italia (Figura 5.20).

L'Italia, attraverso l'ASI, è il principale contributore europeo del progetto che, l'11 febbraio 2015 (Figura 5.21), ha visto il suo coronamento con il successo della missione. Dopo essere stato rilasciato ad una quota di circa 320Km dal vettore VEGA, il veicolo IXV ha iniziato la sua missione completamente autonoma raggiungendo una quota massima di 413Km per poi iniziare la fase di rientro all'interfaccia con l'atmosfera terrestre a 120Km di quota e con una velocità di 7,5km/s, rappresentativa di un rientro da orbita bassa. Durante la fase di rientro, che si è svolta in condizioni assolutamente nominali, sono state raccolte le informazioni di circa 300 sensori, capaci di monitorare lo stato del veicolo in tutti i suoi componenti critici ed in particolare quello del sistema di protezione termica.

La missione si è conclusa con l'apertura del paracadute supersonico a M=1.5 e il successivo ammaraggio nell'oceano pacifico, dove la navetta è stata recuperata da una nave italiana che la trasporterà in Europa per l'effettuazione delle verifiche post-volo.



FIG. 5.20 IXV INTEGRAZIONE CON VEGA (CREDIT ESA)

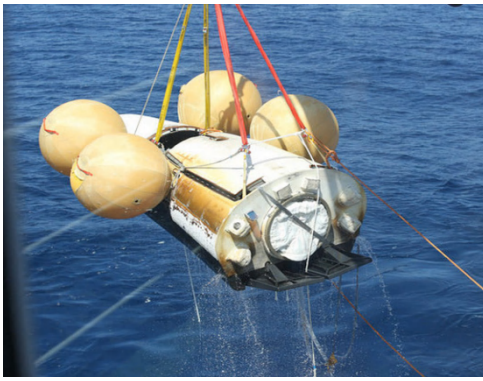


FIG. 5.21 IXV: RECUPERO DOPO IL VOLO DEL FEBBRAIO 2015 (CREDIT ESA)

Thales Alenia Space in Italia, *prime* industriale di IXV, che ha gestito tutte le attività di sistema, integrazione e implementazione della missione, si è avvalso di numerose altre aziende italiane che hanno fornito un contributo importante al successo della missione: ALENIA AERMACCHI (LEONARDO), AVIO, AEROSEKUR, ALTEC, SELEX, TELESPAZIO, TELEMATIC SOLUTIONS, F.lli NERI.

Il CIRA, oltre a fornire assistenza tecnica all'Agenzia Spaziale Europea per le attività di ingegneria di sistema in materia di aerodinamica, aerotermodinamica, sperimentazione in volo ed integrazione, ha contribuito alle attività di qualifica del sistema di protezione termica e ha svolto l'intera fase di progettazione ed esecuzione del *drop* test di un prototipo in scala reale del velivolo IXV per la validazione del sistema di discesa e recupero basato su paracadute e galleggianti.

USV, partito nel 2000 il programma finanziato dal PRORA e gestito da CIRA, ha un obiettivo di tipo incrementale. Infatti, la prima parte si è focalizzata sulla realizzazione di un laboratorio volante per la validazione di tecnologie abilitanti del volo transonico mediante sperimentazione in volo (Figura 5.22). I due "laboratori volanti" gemelli Castore e Polluce, dedicati al volo transonico e basso-supersonico (circa 1.200 km orari) sono stati lanciati tramite pallone stratosferico dalla base di Arbatax in Sardegna. La prima missione è stata realizzata il 24 febbraio 2007 dalla piattaforma Castore, durante la quale si è raggiunta la velocità massima di Mach 1.07, permettendo di acquisire milioni di dati dagli oltre 500 sensori a bordo; durante la seconda missione, effettuata l'11 aprile 2010, è stato raggiunto Mach 1.23 e sono state eseguite in modo completamente autonomo e gestite dal computer di bordo complesse manovre con virate e variazioni di assetto, fino all'ammarraggio.

Il programma **VEGA,** partito nel lontano 1998, finanziato dall'ESA e coordinato da ELV (Italia), ha previsto la progettazione, verifica delle prestazioni (Figura 5.23) e realizzazione del lanciatore per il trasporto in orbita di piccoli carichi, tra i 300 e i 2.000 kg, in orbite basse o polari, in particolar modo eliosincrone. Una caratteristica particolare è stata la possibilità di trasportare due o tre piccoli carichi contemporaneamente e posizionarli correttamente su orbite diverse, capacità non comune nei lanciatori di così piccole dimensioni. È stato lanciato per la prima volta dalla piattaforma

di lancio di Kourou, in Guyana Francese, il 13 febbraio 2012 alle 7 di mattina (le 11 in Italia) portando in orbita LARES - *payload* principale - e le missioni Almasat-1 e i sette *CubeSats*. Nel 2013 è cominciata la sua 'vita commerciale'.



FIG. 5.22 USV1 (CREDIT CIRA)



FIG. 5.23 VEGA WIND TUNNEL TEST (CREDIT ELV)

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 6

SISTEMI AVANZATI PER INTEGRAZIONE, RIFORNIMENTO, TRASPORTO E RIMOZIONE SATELLITI/DETRITI IN ORBITA

Attualmente, la più grande limitazione che coinvolge la quasi totalità degli *asset* spaziali è l'assenza di una *capacità sostenibile* per l'accesso dopo il lancio agli oggetti in orbita, per poter effettuare manutenzione o ridurre rischi relativi alla permanenza in orbita di materiale non attivo.

Nell'ultimo decennio diverse soluzioni sono state studiate e proposte per introdurre nel settore pubblico e privato tale capacità e in ambiti del settore spaziale molto diversi tra loro, dall'Esplorazione Spaziale Umana del sistema solare alla regolamentazione ed ottimizzazione dell'accesso allo Spazio vicino per ragioni scientifiche, commerciali e militari. Inizia anche ad essere concreta la necessità di avere a disposizione degli elementi nuovi, tendenzialmente "*space based*", provvisti di funzionalità flessibili e caratteristiche di riusabilità.

Questi ***moduli di servizio* o *rimorchiatori spaziali*** (***Space Tug*** nel seguito) devono avere, in funzione dei diversi scenari di missione, vari livelli di abilità.

L'abilità principale, che accomuna tutte le applicazioni, è la **capacità di effettuare il *rendez-vous* con un altro oggetto in orbita**, cioè di avvicinarsi in modo sicuro per poter essere in grado di svolgere la missione o il servizio necessario al proprietario dell'altro oggetto (trasferimento, manutenzione o rimozione). Tale capacità include anche la possibilità di acquisire immagini per effettuare **ispezioni** di oggetti in orbita. Una prima classe di capacità primarie è relativa all'esecuzione di **trasferimenti orbitali** sia da solo che attraccati con satelliti di piccole o medie dimensioni dall'orbita di lancio all'orbita di destinazione, tra diverse orbite operative o verso un'orbita di smaltimento. Questo per ottimizzare l'utilizzo di piccoli e medi lanciatori, per ridurre la quantità di propellente a bordo o per far risparmiare propellente ed estendere la vita di satelliti perfettamente funzionanti, ma che necessitano di modificare sensibilmente i parametri orbitali.

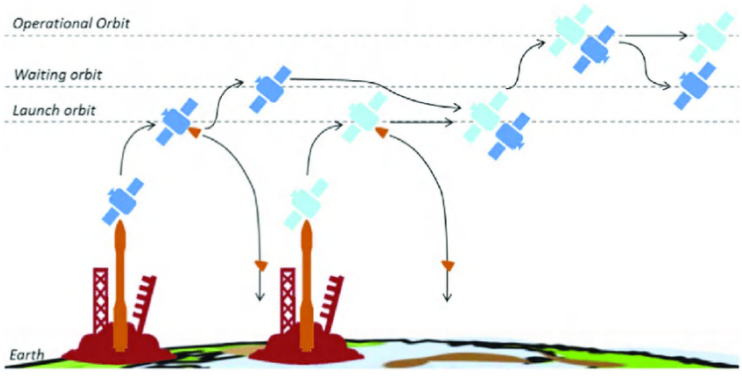


FIG. 6.1 ESEMPIO DI TRASFERIMENTO ORBITALE USANDO UNO SPACE TUG (FONTE: SAPERE STRONG, POLITECNICO DI TORINO E THALES ALENIA SPACE).

Le **tecnologie abilitanti** sono la **robotica**, la **propulsione** e le tecnologie di **controllo, navigazione e guida** per la fase di *rendez-vous* con il detrito e, naturalmente, la **cattura.**

La propulsione deve essere:

- altamente efficiente (per limitare il consumo di propellente);
- in grado di operare diversi cicli di accensione-spegnimento (per supportare missioni multiple);
- regolabile nella potenza erogata (per supportare le varie fasi della missione).

Per gli *Space Tug* anche la durata della vita operativa è estremamente importante ed è critica, in particolare, per il sistema di propulsione. Sono attualmente allo studio vari sistemi di **propulsione elettrica** a bassa spinta che offrono motori potenzialmente di lunga durata, abbinati a sistemi a propulsione chimica che offrono la possibilità di effettuare le manovre più critiche in modo più sicuro, specialmente per il ***rendez-vous* e le operazioni di prossimità**. La scelta tra le tecnologie di propulsione dipenderà, di volta in volta, dall'applicazione tenendo conto anche delle relative limitazioni; per esempio, la propulsione elettrica, basata su piccole spinte continue induce tempi di trasferimento più lunghi rispetto ai motori chimici. La propulsione elettrica inoltre prevede l'utilizzo di grandi potenze elettriche, per generare e gestire le quali è necessario sviluppare adeguati sistemi; ad esempio pannelli solari di grande superficie, flessibili ed ultraleggeri e sistemi di distribuzione innovativi. Per il lungo termine e per orbite più distanti dalla terra, anche sistemi ad energia nucleare vengono considerati.

L'**attracco o la cattura** di un altro oggetto nello spazio caratterizza la maggior parte delle applicazioni degli *Space Tug*. L'applicazione, a breve termine, che comporta la maggior complessità nelle operazioni sarà quella di raggiungere, catturare e rimuovere (de-orbitare o re-orbitare in orbita di smaltimento) satelliti non più operativi o **detriti spaziali** di grosse dimensioni. Tali oggetti infatti non sono cooperativi, hanno caratteristiche fisiche (es. integrità delle strutture, energia residua) e dinamiche (es. rateo di rotazione) non conosciute, che complicano la fase di cattura.

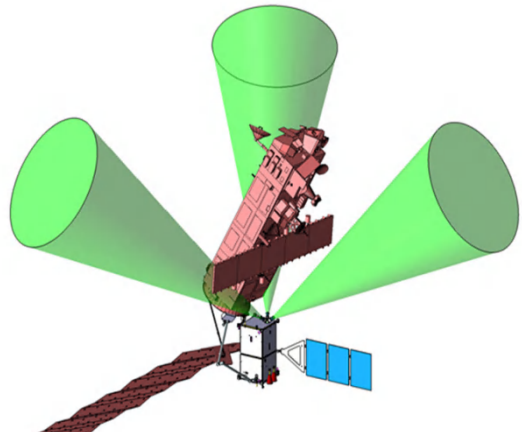


FIG. 6.2 ESEMPIO DI CATTURA A SCOPI DI PULIZIA DELLO SPAZIO (FONTE: STUDIO ESA E.DEORBIT PER LA RIMOZIONE DEL SATELLITE ENVISAT)

Gli scenari più promettenti attualmente allo studio per la pulizia dello spazio (*clean space*), prevedono *Space Tug* operanti in orbite basse, in quanto le più affollate di detriti, che siano in grado di operare missioni multiple e perciò dotati di sistemi robotici per la cattura di oggetti non collaboranti, non controllati e spesso capitombolanti. Per questa classe di elementi sono critiche le **tecnologie di controllo, navigazione e guida** per la fase di ***rendez-vous*** con il detrito e, naturalmente, la **cattura**. Entrambe infatti devono essere funzioni in parte autonome e quindi basate sull'utilizzo di sensori ed architetture S/W e algoritmi in grado di percepire in tempo reale la posizione ed il moto del *target*. Anche l'avionica collegata deve essere di conseguenza altamente efficiente dal punto di vista della capacità e velocità computazionale.
Nel caso di uno *Space Tug* destinato a missioni multiple, che sia appunto "*space based*", anche la capacità di **rifornimento in orbita** di se stesso o di altri oggetti può fornire importanti vantaggi, e anch'essa deve poter essere eseguita con un certo grado di autonomia. Sistemi robotizzati per il rifornimento automatico di propellenti liquidi sono allo studio da parte dei maggiori attori del settore spaziale. NASA ha già eseguito dimostrazioni di trasferimento liquidi in pressione sulla ISS, ed ESA sta studiando un'interfaccia europea *standard* per i futuri satelliti.
In uno scenario di riduzione dei costi ed ottimizzazione dell'utilizzo dei nuovi satelliti, la funzione degli *Space Tug* potrebbe anche essere indirizzata ad ulteriori **operazioni di *servicing* (manutenzione del satellite o dell'orbita)**. I nuovi satelliti potrebbero avvalersi di un elemento esterno per compiere operazioni come **aggiustamenti di orbita** o di rifornimento periodico; di conseguenza potrebbero essere singolarmente più leggeri, semplificati nel *design* ed economici. Altre operazioni orientate al *servicing* potrebbero essere richieste da satelliti esistenti per prolungarne la vita operativa, ad esempio la sostituzione di batterie o la sostituzione del *payload*. Anche in questo caso lo *Space Tug* dovrà essere dotato di tecnologie per la navigazione e *rendez-vous*, cattura e, in generale, della **capacità di manipolazione robotica autonoma** in funzione delle operazioni richieste. Tali capacità introducono anche la necessità di trasporto di materiale in orbita e, per orbite molto affollate (es. costellazioni o megacostellazioni) è allo studio la possibilità di avere *tug* dedicati con depositi o rifornimenti da lanciatori.
Spostandoci in un orizzonte temporale un po' più lontano, ma non meno importante, possiamo facilmente comprendere come gli *Space Tug* siano elementi essenziali in supporto all'**esplorazione umana**. In accordo alle *roadmap* internazionali lo scenario post- ISS vede l'utilizzo di una stazione cis-lunare vista come uno snodo per attività di teleoperazioni sulla Luna oppure come trampolino verso mete più lontane nel sistema solare. In questo scenario potrebbe essere conveniente disporre di uno o più *Space Tug* non solo per **attività di assemblaggio in orbita bassa** dei complessi di esplorazione, ma anche e soprattutto per il **trasporto degli elementi** della nuova stazione post-ISS, alla posizione finale recuperando eventualmente quelli più recenti della Stazione Spaziale Internazionale al termine della sua vita operativa.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Il **numero dei detriti spaziali**, soprattutto nella fascia LEO, è considerato dagli studiosi ormai **oltre la soglia critica**. Gli stati e le agenzie stanno finalizzando regolamentazioni internazionali per imporre ai nuovi satelliti di prevedere la propria rimozione dall'orbita in sicurezza alla fine della vita

operativa. Purtroppo questa misura sembra non essere sufficiente: da analisi eseguite dalla NASA e dall'ESA risulta che è necessario rimuovere ogni anno almeno cinque detriti di grandi dimensioni, tra quelli già presenti, per prevenire l'effetto cascata di collisioni con ulteriore formazione di nuovi detriti altrimenti noto come *Effetto Kessler*. Gli *Space Tug* riutilizzabili, dotati di sistema robotico per la cattura dei detriti, sembrano essere una delle soluzioni maggiormente condivise per affrontare il problema della rimozione nei tempi brevi.

I **nuovi scenari per le reti di satelliti commerciali** prevedono a breve una enorme moltiplicazione di piccoli satelliti in orbita bassa, come dismostrato da nuovi attori quali Google e SpaceX che hanno già iniziato a produrre e lanciare migliaia di satelliti in orbita bassa per diffondere l'accesso ad Internet e realizzare una conessione su scala globale. Alcuni scenari prevedono, in pochi anni, l'aumento di satelliti in orbita dagli attuali 2.100 satelliti attivi a più di 10.000 satelliti, principalmente in orbita bassa, aumentando la generazione di detriti e conseguente rischio di collisione con i detriti esistenti, la cui rimozione dovrebbe essere considerata una priorità per permettere l'accesso e l'utilizzo dello spazio anche in futuro.

Dal punto di vista nazionale, le tecnologie inerenti ai rimorchiatori spaziali (*Space Tug*) fornirebbero all'industria italiana le capacità per essere competitivi a livello internazionale e potrebbero altresì essere utilizzate per portare piattaforme fino all'orbita geostazionaria ed oltre.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

L'idea di uno *Space Tug* riutilizzabile risale agli **anni '60-'70**, quando **NASA** considerò un modulo propulsivo comune a cui si potessero attaccare, a seconda delle necessità, un veicolo abitato o altri *payload*. Era inoltre previsto come opzione un sistema per l'allunaggio. Lo studio fu poi interrotto a causa della riduzione dei fondi del programma Apollo.

In anni più recenti (2005) in **Russia** la società **RKK Energia** ha proposto lo *Space Tug* PAROM per supportare il trasferimento di equipaggio e cargo alla ISS. Anche Lockheed Martin propone attualmente lo *Space Tug Jupiter*, progettato per il rifornimento della ISS ma anche per operazioni di *Servicing* su satelliti essendo dotato di un braccio robotico. Jupiter è anche compatibile con missioni di esplorazione. Con finalità di esplorazione spaziale anche l'attività di Ad Astra Rocket Company, che sta lavorando per sviluppare uno *Space Tug* derivato dal motore a plasma VASIMR.

In **USA**, la società **Spaceflight Inc**. ha invece proposto uno *Space Tug* chiamato *Sherpa* compatibile con il razzo Falcon 9 di SpaceX per il trasporto di *payload* secondari in orbita; il primo lancio è stato effettuato nel 2017. Il **DARPA** (*Defense Advanced Research Projects Agency*) è impegnato nel **programma Phoenix** di sviluppo tecnologico per realizzare un sistema di *servicing* robotico autonomo a satelliti in orbita geostazionaria. Anche l'organizzazione per la ricerca spaziale indiana (ISRO) ha costruito un *upper stage* chiamato PAM-G a motore chimico ipergolico per trasferire carichi da orbite basse ad orbite medie e alte.

L'Europa è attiva sul fronte degli *Space Tug* e dello sviluppo delle relative tecnologie abilitanti. Si ricordano soprattutto il progetto svedese PRISMA che ha dimostrato in orbita aspetti di *rendezvous* e volo in formazione, il **programma ESA *e.deorbit***, per la rimozione di grandi detriti (in questo caso il satellite Envisat, del peso di circa 8 tonnellate), il programma DEOS finanziato dall'agenzia tedesca DLR per una missione dimostrativa in orbita delle tecnologie per la cattura.

A livello nazionale l'Italia è impegnata da anni, e l'ultimo sforzo integrato si è concluso recentemente nel programma di ricerca parte dei *Cluster* Tecnologici Nazionali, nel **progetto SAPERE-STRONG** per lo sviluppo di uno *Space Tug* compatibile con il lanciatore Vega. Il progetto (triennale) ha incluso i principali attori industriali e accademici del compartimento spaziale italiano ed è orientato allo sviluppo di tecnologie di propulsione, per il *rendez-vous and docking*, robotiche e per rifornimento in orbita oltreche allo sviluppo dei relativi dimostratori tecnologici. L'esperienza acquisita in questa attività di ricerca deve essere trasformata in missioni dimostrative nello spazio per poter accedere al mercato dell'*on-orbit servicing* che, si prevede, aumenterà gradualmente nel prossimo decennio fino ad aprire un nuovo segmento del mercato spaziale.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 7

TECNOLOGIE E APPLICAZIONI PER LA SICUREZZA NELLO SPAZIO

Il programma ***"Space Situational Awareness"* (SSA)** è l'acronimo che indica l'insieme delle tematiche volte a sviluppare la conoscenza dell'ambiente spaziale e la consapevolezza delle sue potenziali minacce alle attività umane, sia incombenti direttamente sugli assetti (*assets*) spaziali e/o terrestri che indirettamente sui servizi ad essi connessi.

Le **minacce** provenienti dall'ambiente spaziale sono essenzialmente:

- ***Space Debris* (SD)**: detriti spaziali, che mettono a rischio l'integrità dei satelliti e dei veicoli spaziali orbitanti intorno alla Terra;
- ***Near Earth Objects* (NEOs)**: corpi celesti la cui orbita può divenire prossima a quella della terra e quindi potenzialmente a rischio di impatto;
- ***Space Weather* (SWE)**: eventi fisici solari particolarmente intensi, in grado di influenzare l'ambiente spaziale fra sole e Terra, la magnetosfera, l'atmosfera, la geosfera e molti sistemi tecnologici sensibili a tali perturbazioni.

I NEOs e lo *Space Weather* rappresentano minacce naturali, gli *Space Debris* sono invece derivanti dalle attività umane.

L'obiettivo dei programmi di SSA è la **protezione degli assetti critici spaziali e terrestri**. La protezione e l'allerta nei confronti delle minacce provenienti dallo spazio è un tema rilevante sia per le attività spaziali sia per quelle terrestri, considerata la crescita del numero di sistemi ed applicazioni dipendenti da dati ed infrastrutture spaziali.

Space Surveillance and Tracking (SST) per protezione da Space Debris

I **detriti orbitali** spaziali sono tutti quegli oggetti artificiali in orbita intorno alla terra non più utilizzabili le cui **dimensioni** variano dall'ordine del metro, come il caso dei satelliti non più operativi e stadi di lanciatori, a sub-millimetriche, come il caso di scorie di motori a razzo o particelle di vernice. Le loro **traiettorie** sono stimabili a partire da **osservazioni frequenti e accurate**. Tali osservazioni, che consentono di ottenere le posizioni dei detriti, possono essere condotte con:

- **strumenti ottici (telescopi)** che misurano gli angoli grazie alla luce del sole riflessa dalle loro superfici. A tal fine è stato studiato, ed attualmente è in corso di sviluppo, il **telescopio a larghissimo campo** chiamato ***Fly Eye***. Quest'ultimo non solo rileva oggetti del diametro di alcuni cm, ma offre una elevata risoluzione angolare dell'ordine del millesimo di grado;
- **radar** che misurano distanze ed angoli e loro variazioni. Combinando le posizioni misurate con i tempi di rilevazione dei dati, è possibile stimare i parametri orbitali dei detriti. Il principale vantaggio dei sensori radar è che essi, rispetto agli ottici, non sono limitati dalle condizioni d'illuminazione e sono molto sensibili a piccoli oggetti.

Le osservazioni terrestri con **telescopio ottico**, a motivo dell'irradianza solare spettrale, richiedono che gli oggetti siano illuminati dal sole mentre il cielo sullo sfondo è scuro, perciò le osservazioni di oggetti in orbita bassa o LEO (*Low Earth Orbit*) possono essere eseguite, in funzione della stagione e della latitudine di osservazione, solo durante alcune ore dopo il tramonto e prima dell'alba. Per questa ragione è necessario creare una **rete di telescopi** di terra in quanto vantaggiosa rispetto al solo radar nel bilancio costo-prestazioni. Per questo scopo è stato studiato ed è in corso di sviluppo il telescopio a larghissimo campo chiamato *Fly Eye* che verrà trattato in uno specifico paragrafo.
Nonostante questa limitazione temporale, che non investe i sistemi radar, i sensori ottici hanno un grande vantaggio: la loro sensibilità a parità di dimensioni dell'oggetto diminuisce proporzionalmente al quadrato della distanza piuttosto che con la quarta potenza caratteristica del radar. Questo è il motivo per cui i telescopi ottici sono utilizzati principalmente per indagare l'ambiente dei detriti a media e alta quota.
Un possibile **schema cooperativo radar** e **telescopi** prevede che orientativamente già in orbita LEO oltre i 1.000Km cominci ad operare il telescopio a larghissimo campo. Il telescopio *Fly Eye* non solo rileva oggetti del diametro di alcuni cm, ma offre una elevata risoluzione angolare dell'ordine del millesimo di grado. L'*output* delle osservazioni ottiche sono le misure degli angoli, che identificano la posizione dell'oggetto sulla proiezione del cielo, oltre alle eventuali misure fotometriche, per la caratterizzazione dell'oggetto.
I **radar** invece sono molto efficienti per rilevare e tracciare oggetti di piccole dimensioni (da pochi centimetri o anche più piccoli) in **orbita LEO**, cioè al di sotto di 2.000 km di altezza rispetto alla superficie terrestre, con il fondamentale vantaggio rispetto ai telescopi ottici *di non essere limitati dalle condizioni d'illuminazione* ed essere molto sensibili a *piccoli oggetti*. D'altro lato, la sensibilità dei radar diminuisce con la quarta potenza della distanza, quindi questo tipo di sensore non può essere usato per osservare detriti in orbite più alte della classe MEO (*Medium Earth Orbit*). Per questo motivo è vantaggioso *combinare* la rete radar con la rete ottica in LEO.
Due tipologie di radar sono utilizzabili per questo scopo. Il primo tipo sono i radar a **campo di vista ristretto**, costituiti da un piatto di antenna parabolica, che controllano la direzione di visualizzazione meccanicamente. Nella seconda categoria ricadono i ***"phased-array radar"***, caratterizzati da un ampio campo visivo e da un controllo elettronico della direzione del fascio. I radar "*phased array*" sono ideali per scopi di indagine in quanto possono rilevare e monitorare più oggetti contemporaneamente in un campo visivo tipicamente ampio: 120° estendibile ai 360°. Grazie all'*ampio angolo di vista* tali radar possono essere efficacemente utilizzati per creare un *"fence"* (pennello) nello spazio in cui si rilevano passaggi di oggetti nuovi o che hanno modificato significativamente la loro orbita rispetto a quelli normalmente tenuti sotto controllo dai cataloghi spaziali (funzione di sorveglianza). Le *antenne paraboliche*, d'altro canto, possono inseguire solo oggetti singoli in un ristretto campo di vista e, dovendo esservi puntati meccanicamente, possono monitorare solo oggetti già noti, ma sono in grado poi di rilevarne la posizione con grande precisione angolare, migliorando l'accuratezza della predizione dell'orbita.
La precisione della rilevazione angolare del radar di tipo "*phased-array*", a causa dell'ampio campo di vista, è generalmente inferiore rispetto a quella di antenne paraboliche di dimensioni simi-

li, a meno di sviluppare antenne *phased array* di dimensioni e costi rilevantissimi.
Una *combinazione* delle due tipologie di radar con un sistema di *fusione dati* è la soluzione per incrementare notevolmente le prestazioni raggiungibili.
Le **osservazioni ottiche** e quelle **radar** possono essere eseguite sia da **Terra** che dallo **Spazio**.
Le *osservazioni dallo Spazio*, pur essendo meno efficienti rispetto alle osservazioni da terra, beneficiano di vantaggi che possono riassumersi nelle seguenti considerazioni:

- assenza di limitazioni dovute a condizioni atmosferiche, al ciclo notte/giorno e alla luce riflessa dalla luna: le osservazioni dallo spazio sono sempre possibili (come le osservazioni *ground based* con sensori radar);
- ampia area del cielo disponibile per l'osservazione, perciò è possibile implementare la sorveglianza di differenti orbite. Inoltre, una copertura totale del cielo da terra sarebbe possibile solo con una ampia rete di sensori installati in maniera diffusa su tutta la superficie del globo, soluzione estremamente gravosa e difficile da implementare, considerando anche le estensioni degli oceani. Una costellazione di satelliti invece permette di colmare le lacune dei sistemi di terra attraverso opportune strategie di osservazione;
- assenza di limitazioni geografiche e geopolitiche. Per accedere a particolari regioni nel cielo è necessario situare i sensori di terra in zone geografiche specifiche. Ad esempio, per la sorveglianza delle orbite GEO è necessaria una rete di sensori distribuiti intorno all'equatore. Oltre alle limitazioni dovute alle zone oceaniche, operare uno strumento in un paese estero non comporta solo potenziali problemi geopolitici, ma anche un aumento dei costi di funzionamento e manutenzione;
- rapidità di osservazione. Caratteristica di grande importanza se si desidera un sistema di sorveglianza e monitoraggio in grado di rispondere ad eventi "*time-critical*";
- maggiore sensibilità. Per l'assenza di perturbazioni atmosferiche (turbolenza e assorbimento), minore intensità di fondo, minori distanze dei *target* e velocità angolari generalmente più basse, si migliora la conoscenza della posizione del *target* e quindi la sua determinazione orbitale ed è più semplice il rilevamento di piccoli oggetti.

Va comunque ribadito che nel bilancio costo-prestazioni mentre una rete di terra può rilevare e catalogare il 97-98 % dei detriti residenti in LEO con diametro di alcuni cm, una rete satellitare può rilevare a parità di costi solo una piccola percentuale della popolazione esistente.

Le osservazioni con i sensori radar di terra hanno invece i seguenti vantaggi:

- assenza di limitazioni dovute alle condizioni atmosferiche, al ciclo notte/giorno e alla luce riflessa dalla luna: le osservazioni radar da terra sono sempre possibili;
- non ci sono limitazioni di peso, dimensioni ed alimentazione tipiche degli strumenti da lanciare nello spazio;
- reti di sensori radar a terra sono già esistenti ed interconnesse, per esempio a scopo di Difesa Aerea, con possibilità di impiego duale.

I sensori, siano essi **installazioni terrestri** o **su satelliti**, rappresentano le *sorgenti* dei dati di os-

servazione di un sistema completo (*end to end*) di monitoraggio. Infrastrutture e centri di raccolta ed elaborazione dei dati devono necessariamente completare tale sistema, affinché questo sia in grado di *federare* le varie sorgenti, *armonizzare* il loro contenuto differente (complementare) e produrre con le modalità e le tempistiche necessarie le informazioni verso gli utilizzatori finali.
Le attività che consentono di **monitorare** i detriti spaziali, **catalogare** la loro posizione, **identificare** possibili collisioni in tempo utile per poter intervenire adeguatamente sono identificate come **SST** (*Space Surveillance and Tracking*) e si basano su varie tecnologie hardware e software, applicabili sia a sensori installati a terra che su piattaforme spaziali:

- sensori radar e telescopi idonei al *Survey and Tracking* dei detriti;
- software per la "Fusione Dati" di caratteristiche diverse, provenienti da più sensori come prima descritti, asincroni e da sincronizzare;
- software per la propagazione e determinazione orbitale di satelliti e detriti;
- software per la "*Collision Avoidance*", in grado di effettuare l'analisi della congiunzioni e la valutazione del rischio di impatto;
- software per l'analisi del rientro, in grado di determinare l'orbita di rientro di eventuali detriti a terra e il sito di impatto a terra;
- software per l'analisi della frammentazione, in grado di analizzare i rischi derivanti dalla frammentazione di possibili impatti in orbita.

Ovviamente, la reale efficacia di un sistema **SST** si basa sull'abilità di **integrare tali tecnologie** in un *centro nazionale o internazionale* in grado di assicurare le seguenti capacità:

- processamento dei dati provenienti da una rete dedicata di sensori, la determinazione delle orbite degli oggetti osservati, la correlazione con quelle degli stessi oggetti osservati precedentemente, l'aggiornamento del catalogo degli "*space objects*" e la pianificazione di nuove richieste di osservazioni;
- gestione ed erogazione di un servizio operativo permanente che preveda "*collision avoidance analysis*", "*fragmentation and reentry analysis*", "*risk assessment and warnings*";
- monitoraggio di frammentazione da impatto e di rientro di satelliti a fine vita.



FIG. 7.1 ANTENNE AL FUCINO SPACE CENTRE (CREDIT TELESPAZIO)

Near Earth Objects

I *Near Earth Objects* (**NEO**) sono *corpi celesti* del sistema solare di ridotte dimensioni che orbitano nei pressi della Terra. I NEO non sono considerati particolare fonte di rischio per gli assetti spaziali. Se di grandi dimensioni però rappresentano una minaccia per il pianeta e per le forme di vita da esso ospitate.

La "Scala Palermo" del rischio di impatto per NEO di dimensioni caratteristiche dell'ordine dei 5 km prevede il rilascio di energia dell'ordine di 10^8 megatoni con effetti su scala globale (il NEO conosciuto di maggior diametro, 38.5 km, è 1.036 Ganimede).

Il passaggio ravvicinato alla Terra di NEO non è un fenomeno raro. I possibili effetti di un eventuale impatto possono essere scongiurati dalla tempestiva scoperta e determinazione orbitale dei NEO in rotta di collisione con la Terra con le conseguenti contromisure (evacuazione, missione di deflessione). Poiché la popolazione di NEO è elevata (ad oggi sono conosciuti circa 12.410 oggetti) e le condizioni di osservabilità sono transitorie, l'incertezza sulla stima della loro posizione è legata alla qualità delle osservazioni, al loro numero, alla visibilità dell'oggetto (quantità di luce riflessa e dimensioni proprie), al tempo trascorso dalle ultime osservazioni, alla sua ri-osservabilità, ecc...

È dunque necessario disporre di una *rete di sensori* (per lo più *ottici* considerate le grandi distanze, e anche radar solo per gli oggetti molto vicini alla terra) per la scoperta e l'inseguimento continuo o reiterato nel tempo, con soluzioni operative per la gestione integrata delle osservazioni (*planning, scheduling, tasking*), della successiva elaborazione dei dati, con disseminazione delle informazioni ad ampio raggio (comunità scientifica, organi di comunicazione, *stakeholders* e infine i *decision makers*).

È necessario altresì disporre di *enti autoritativi* che provvedano alla validazione delle osservazioni e di tante altre informazioni di fondamentale importanza per la definizione delle azioni di mitigazione e contromisure. Di fondamentale importanza è lo sviluppo di *asset spaziali orbitanti* dedicati alla scoperta dei NEO, posizionabili *in orbita terrestre* o nei punti Lagrangiani del sistema sole terra.

Space Weather

Lo ***Space Weather*** è l'insieme dei fenomeni legati ad eventi solari, quali *flares*, eiezioni coronali di massa, emissioni di radiazioni e particelle ad alta energia, che perturbano il livello di emissioni di fondo e che, una volta raggiunta la magnetosfera e l'atmosfera terrestre, inducono in esse una serie di fenomeni fisici particolari, quali tempeste geomagnetiche, riconnessione e sconnessione delle linee di campo elettromagnetico, aurore boreali, ionizzazione a quote ionosferiche, accumulo di carica elettrica, correnti elettriche in atmosfera ed al suolo, scintillazioni, espansione della termosfera.

Tali eventi, se particolarmente intensi, possono avere effetto sulla propagazione delle onde elettromagnetiche nei mezzi perturbati e su una gran varietà di sistemi.

La realizzazione di un centro per l'erogazione di servizi di SWE richiede lo sviluppo delle seguenti tecnologie e funzionalità:

- sviluppo di sensori capaci di effettuare osservazioni e misure delle varie classi perturbazioni di origine solare ed integrare opportunamente le fonti di dati disponibili;

- sviluppo di modelli per la valutazione dello stato attuale in base alle misure raccolte ed ai dati disponibili (*now casting*);
- sviluppo della modellistica fisica delle fenomenologie soggiacenti e di strumenti software per la predizione dell'evoluzione e degli effetti dello SWE a breve, medio e lungo termine;
- definizione/*update* di scale di rischio in funzione dell'entità delle perturbazioni e dei sistemi coinvolti;
- capacità di catalogazione degli effetti in funzione dei livelli di perturbazione e valutazione dei rischi connessi;
- valutazione della degradazione delle *performances* dei sistemi in funzione del livello delle perturbazioni;
- definizione, progettazione, integrazione, test e validazione di infrastrutture hardware per la gestione dei dati, calcolo delle previsioni e disseminazione dei risultati;
- definizione delle azioni di mitigazione da intraprendere in funzione dell'entità degli eventi, del tipo di allerta da emettere;
- definizione e coinvolgimento degli *stakeholders*, *decision makers* e *user communities*;
- integrazione di *facilities*, capacità ed iniziative nazionali con le analoghe portate avanti in campo europeo.

Fra le *tecnologie abilitanti* per la fornitura di un servizio prototipale figurano:

- studio architetturale fisico-funzionale del centro per l'erogazione di servizi SWE, a partire dai requisiti utente/cliente, risorse esistenti (*assets, facilities*, sensori, basi di dati, modelli, prodotti), identificazione dei *gaps*, definizione della *roadmap* degli sviluppi;
- sviluppo di telescopi MOTH per il monitoraggio e previsione di eventi solari responsabili di scintillazione ionosferica;
- sviluppo ed aggiornamento di strumenti per l'analisi dei dati forniti dalla spettrometro PAMELA ed AMS02 per monitoraggio dei flussi galattici di protoni;
- algoritmi per la generazione di ionogrammi in tempo reale a partire da dati rilevati da ionosonde e da ricevitori GNSS;
- apparati per la determinazione degli spettri radio solari ed indici radio in tempo reale relativi alla banda VHF;
- apparati per il monitoraggio della emissione radio solare nella banda VHF per rilevare potenziali interferenze causate da intensi *burst* radio solari;
- apparati per il monitoraggio della densità di flusso e percentuale della polarizzazione circolare dell'emissione radio solare nella banda L per la rilevazione di potenziali interferenze causate da intensi radio *burst* solari;
- metodi di analisi di regressione logistica applicata a parametri di precursori solari, quali i brillamenti nei raggi X e i radio *burst* di tipo III per la previsione a breve termine degli eventi di SEPs;
- modelli di stima probabilistica delle condizioni eruttive del sole basati su database di brillamenti solari e *coronal mass ejection*, accoppiati ad analisi delle condizioni geofisiche in prossimità della Terra per la valutazione degli effetti sul sistema geofisico e della probabilità di

innesco di tempeste geomagnetiche, da utilizzarsi nei modelli ionosferici della propagazione dei segnali di navigazione GPS/GNSS e comunicazioni in banda HF;

- metodi di analisi di regressione logistica applicata a parametri di precursori solari, quali i brillamenti nei raggi X e i radio *burst* di tipo III per la previsione a breve termine degli eventi di SEPs;
- apparati per il monitoraggio della densità di flusso e percentuale della polarizzazione circolare dell'emissione radio solare nella banda L per la rilevazione di potenziali interferenze causate da intensi radio *burst* solari;
- Upgrade di magnetometri per la monitoraggio dei processi dinamici in magnetosfera che si originano dall'interazione con il Vento Solare;
- modellistica dei sistemi di correnti ionosferiche e magnetosferiche durante periodi di intensa attività geomagnetica;
- sviluppo di modelli per il calcolo dell'interscambio di particelle ionizzanti tra ionosfera e plasmasfera durante intensa attività geomagnetica.

Come nel caso *Space Debris* e *Near Earth Objects*, anche per lo *Space Weather* è fondamentale disporre di una **rete distribuita di sensori** e di **infrastrutture** per la raccolta, l'elaborazione, la gestione e l'archiviazione dei dati, la disseminazione e la fruizione delle informazioni, attraverso l'implementazione di servizi "*user oriented*", l'individuazione ed il coinvolgimento dei *decision makers* nella gestione degli interventi e delle azioni di prevenzione.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Space Debris

Dall'inizio dell'era spaziale, l'umanità ha eseguito diverse migliaia di lanci nello Spazio. Tutto il materiale associato a queste missioni può rientrare nell'atmosfera terrestre, finire nello spazio profondo o rimanere in orbita attorno alla Terra.

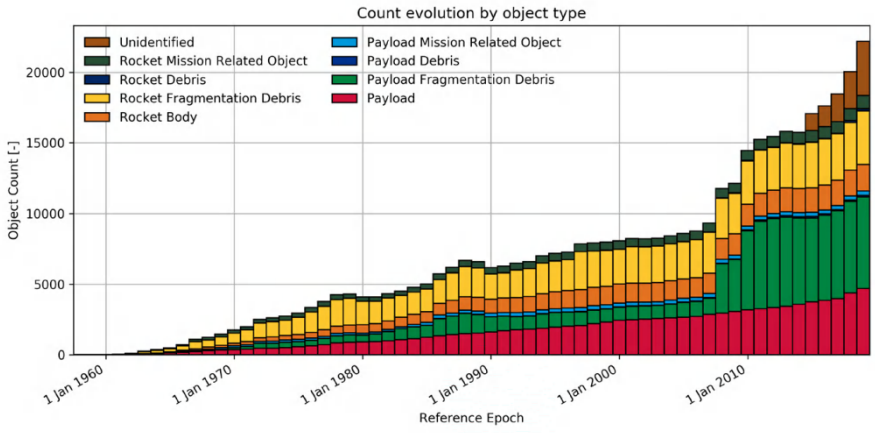


FIG. 7.2 CRESCITA NEL TEMPO DELLA POPOLAZIONE DEI DETRITI SPAZIALI. I COLORI INDICANO L'ORIGINE DIVERSA DEI DETRITI COME INDICATO IN LEGENDA (CREDIT ESA).

Quest'ultima categoria di detriti popola le stesse regioni nello spazio che sono utilizzate per i satelliti operativi. I detriti spaziali si trovano quindi soprattutto nelle **orbite geocentriche** con altitudini che vanno da **300** a **40.000 km**.
I detriti spaziali rappresentano uno dei principali rischi per le missioni spaziali. Ciò è particolarmente vero data l'elevata velocità relativa tra i vari oggetti in orbita.
Nel caso di una collisione in orbita bassa, la velocità relativa tra i due oggetti collidenti può arrivare fino a 16 km/s. La probabilità di collisione, data l'ampia distribuzione spaziale e le velocità relative mediamente inferiori in gioco (500 m/s), è più bassa in orbite geostazionarie.

Near Earth Objects

Il rischio legato ai NEO è essenzialmente quello di un impatto a terra che, se di grandi proporzioni (decine di Km), avrebbe conseguenze catastrofiche ed effetti su scala globale. La possibilità di deviare NEO di grandi dimensioni richiederebbe un preavviso dell'ordine di un centinaio di anni. Impatti rilevanti in zone densamente popolate porrebbero il problema di evacuazione di un gran numero di abitanti con le problematiche connesse.

Space Weather

Le perturbazioni indotte dallo SWE interferiscono su vasta scala con l'ambiente e gli *apparati tecnologici*, in primis gli *assets* spaziali ed i relativi servizi: dai satelliti, al traffico aereo, alle reti di telecomunicazione (spaziali e terrestri), alle comunicazioni radio, al controllo remoto di velivoli senza pilota, alle catene di comando C4I, alla reti di distribuzione di energia. La rilevanza crescente dello *Space Weather* è da ricondursi alla diffusione e all'incremento del livello tecnologico dei sistemi in uso in seno alla società odierna, che li rende maggiormente sensibili alle perturbazioni di origine solare. Le azioni di mitigazione e di prevenzione si basano essenzialmente sulla raccolta e sfruttamento dei dati relativi all'attività solare ed ai suoi effetti e sulla disponibilità di sistemi capaci generare uno *stato di allerta* con adeguato anticipo. La possibilità di intervento è quindi legata alla capacità di effettuare osservazioni e misure (da terra e dallo spazio), alla capacità di elaborazione di dati eterogenei, alla disponibilità di modelli di *nowcast* e previsione a breve medio e lungo termine degli eventi solari e dell'intensità del loro effetto su eliosfera, magnetosfera e geosfera, e sui sistemi tecnologici che consentano una sufficientemente accurata previsione degli effetti dell'attività solare. Lo sviluppo di un centro di erogazione di servizi di SWE è pertanto di fondamentale importanza.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Space Debris

In Italia, sono presenti assetti, strumenti e competenze a differenti livelli di maturità tecnologica, come indicato di seguito a titolo di esempio:

- FADR è il "*Fixed Air Defense Radar*" (RAT-31 DL), di proprietà dell'Aeronautica Militare Italiana, distribuito in numerosi siti che coprono tutta l'estensione del Paese, collegati in rete;
- nell'ambito del programma COSMO-SkyMed dell'ASI, Telespazio ha sviluppato e opera i *tools* "*Debris Monitor*" e "*Collision Avoidance*", per l'analisi delle congiunzioni, la valutazione del ri-

schio di impatto in orbita e la gestione di manovre elusive per i satelliti della costellazione COSMO-SkyMed;

- nell'ambito di attività di ricerca e sviluppo nel campo dello *Space Surveillance and Tracking*, il Politecnico di Milano ha sviluppato due tool prototipali per la propagazione orbitale avanzata in grado di studiare la dinamica di oggetti in orbita terrestre;
- Il *tool* prototipale *PlanODyn* per la propagazione orbitale veloce, basato su tecniche semi-analitiche;
- Il tool prototipale AIDA (*Accurate Integrator for Debris Analysis*) per la propagazione accurata di orbite, basato sull'integrazione numerica della dinamica di oggetti in orbita terrestre (*Infrastructure belonging to ASI, IT-MOD and INAF*).

Al fine di mitigarne i rischi e di porre in campo iniziative di gestione degli stessi, in Europa si è dato il via al processo di *integrazione delle risorse e dei servizi* esistenti, di individuazione delle esigenze di ulteriori sviluppi, di definizione delle infrastrutture necessarie e di definizione ed erogazione di servizi precursori di informazione, allerta ed intervento.
Per quanto concerne l'Europa, l'accesso alle informazioni relative a SST è stato, fino ad oggi, in gran parte *dipendente* da fonti non-europee. Per questo motivo si ha la necessità di sviluppare una capacità SST autonoma e perciò è stato avviato un programma per la realizzazione di un sistema completo di "*Space Surveillance and Tracking*".

Telescopio Fly Eye

Con l'avvio del programma europeo SSA *Space Situational Awareness*, l'iniziativa denominata *Fly Eye Telescope* prende corpo nel 2009 presso OHB Italia Spa, ad opera di autorevoli esperti del settore, per mettere a punto le specifiche di uno strumento ottico innovativo di terra, per risolvere alla radice il problema del rilevamento dei detriti spaziali. L'architettura del *Fly Eye* (che affonda le radici nell'architettura ideata dal Prof. Roberto Ragazzoni) si distingue nettamente da tutte le altre soluzioni convenzionali per le sue elevate prestazioni. Tale architettura coniuga nello stesso strumento due aspetti apparentemente antitetici: il larghissimo campo di vista pari a 44° quadrati e la risoluzione del pixel (del secondo d'arco) ottimizzata per i siti osservativi astronomici europei e per gli algoritmi avanzati di correlazione orbitale.
OHB Italia ha sviluppato un prodotto modulare integrabile e quindi idoneo alla produzione industriale. Il grandissimo campo di vista permette al telescopio *Fly Eye* di scansire più di due volte per notte tutto il cielo visibile. Ciò ha valso a OHB Italia un contratto per la costruzione del primo prototipo per la scoperta degli asteroidi adottando la tecnica di osservazione del cielo denominata *Wide Survey*. Quest'ultimo permette di informare la Protezione Civile, con un preavviso di circa una settimana dall'imminente impatto di un Asteroide con dimensioni tipiche tra i 10 e i 100m su una determinata regione della terra, in modo tale da permettere l'evacuazione anticipata della popolazione a rischio.
In Francia, dal 2005, è attivo un sistema di sorveglianza spaziale con l'elaborazione dei dati eseguita presso il Complesso Balard Air a Parigi.
La Germania si avvale di un radar appartenente al Fraunhofer Institute. Il sistema di *Tracking &*

Imaging Radar (TIRA) del Fraunhofer FHR (Wachtberg) funge da struttura centrale per lo sviluppo e la ricerca di tecniche radar per il rilevamento e la ricognizione degli oggetti nella spazio, e relativa valutazione del rischio di rientro dei satelliti. I dati acquisiti dal TIRA costituiscono la base per lo sviluppo di tecniche di classificazione basata su immagini e algoritmi di identificazione. Gli Stati Uniti utilizzano da anni un Sistema di "*Space Surveillance and Tracking*" che si avvale di una rete mondiale di 29 sensori identificata con la sigla SSN (*Space Surveillance Network*), costituita da radar e telescopi ottici, sia militari che civili, adibiti alla sorveglianza dello spazio.

Near Earth Objects

L'Italia riveste da tempo un ruolo primario a livello mondiale nello studio dei NEO. Le principali infrastrutture Europee che forniscono informazioni sui NEO sono il sito NeoDys-2 dell'Università di Pisa e il NEO *Control Centre* dell'Agenzia Spaziale Europea di ESRIN a Frascati. Negli Stati Uniti sono attivi il NEO *Program* presso il *Jet Propulsion Laboratory* della NASA e il *Minor Planet Center* (MPC) presso lo *Smithsonian Astrophysical Observatory* di Cambridge in Massachusetts.

Space Weather

A parte l'Unione Europea e gli Stati Uniti, poche altre potenze spaziali hanno a loro disposizione infrastrutture di SWE di osservazione e previsione.

Le infrastrutture europee ed americane di primo piano sono:

- **il portale europeo per lo SWE (ESWeP)**: ESWeP è un portale web che fornisce un punto di accesso centralizzato alla comunità SWE per la condivisione le loro conoscenze e dei risultati;
- **ESA-SSA *Space Weather Service Network* (SWENET)**: il campo di applicazione peculiare è l'accesso e l'utilizzo indipendente a informazioni SWE e strumenti di previsione;
- ***National Oceanic and Atmospheric Administration - Space Weather Prediction Center* (NOOA-SWPC)**: è il fornitore primario di servizi SWE negli Stati Uniti;
- ***US Air Force Meteo Agency* (USAF-AFWA)**: risponde alle esigenze della comunità degli utenti militari;
- ***National Agency for Space Administration* (NASA)**: il ruolo è scientifico e non operativo, missioni scientifiche della NASA come ACE forniscono informazioni SWE critiche, il programma NASA "*Living with a star*" si pone come obbiettivi ricerche e tecnologie rilevanti per le operazioni. Prodotti che sono candidati per l'eventuale trasferimento dalla ricerca alle operazioni includono la tecnologia dei sensori e modelli SWE che possono essere mutati in strumenti operativi per la previsione e la definizione dello stato attuale dell'ambiente SWE.

Solarmonitor

È un sistema *web* di monitoraggio solare, gestito e sviluppato da un *team* di ricercatori del *Trinity College* di Dublino. Il *Database* è composto principalmente da dati satellitari degli Stati Uniti, con l'eccezione dei vecchi dati di SOHO e della recente aggiunta delle immagini UV SWAP-PROBA2 (2010). Va osservato che in Italia è da lungo tempo attiva una numerosa comunità scientifica operante in ambito *Space Weather*, riunitasi di recente nell'associazione SWICO (*Space Weather Italian Community*).

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 8

TECNOLOGIE PER ANTENNE A BORDO DI SATELLITI

Le antenne a bordo di satelliti si diversificano in quattro settori applicativi:

- Telecomunicazioni a larga banda;
- Osservazione della Terra;
- Navigazione;
- Scienza (primariamente esplorazione del sistema solare, orbite aperte).

Antenne di Telecomunicazione

Abbracciano un vasto spettro di frequenze, dalla banda L fino alla banda Ka ed oltre (banda Q/V) diversificandosi in *numerose configurazioni*; a riflettore, ad *array* diretto (planare o conforme), ad apertura ed infine in configurazioni attive o semi attive ed utilizzanti diversi domini tecnologici trasversali alle diverse applicazioni (tecnologie in composito per riflettori solidi o grigliati, meccanismi ad alta fatica e risoluzione per il puntamento fine, architetture per grandi antenne a rete dispiegabili in volo, catene a radiofrequenza ad elevate prestazioni di potenza e purezza di polarizzazione, tecnologie stampate per *array* a *patches*, reti integrate in composito multistrato, elementi radianti filtrati e compatti per l'integrazione in *array* attivi ecc...).

Le **antenne dispiegabili** in volo (sui pannelli laterali del satellite) sono tipicamente in banda L/S per i servizi di *Digital Audio Broadcast* e *Mobile Satellite Services*, in banda C per i servizi *Fixed Satellite Service* (FSS) e in banda Ku/Ka (*shaped, multibeam* o *multimode* per servizi FSS, *Direct Broadcast Satellite* (DBS) e multimedia). Le antenne sono a riflettore solido in fibra di carbonio (classe 2-5 m) o a *mesh* (*unfurlable*, classe 6-12m). Le tecnologie più usate e sulle quali sviluppi specifici verranno concentrati sono *Thick shell, Thin shell,* membrane triassiali, riflettori grigliati e riflettori dispiegabili alle quali si affiancano le tecnologie dei meccanismi di ritenzione e rilascio e dei sistemi di illuminazione a radiofrequenza. Nelle antenne a riflettore solido, si può prevedere - nell'arco dei prossimi 3-5 anni - un notevole impegno nello sviluppo delle tecnologie per i riflettori leggeri per applicazioni TLC in banda C/Ku ed S e di sistemi di illuminazione ottimizzati per le alte potenze, bassi livelli di intermodulazione, basse perdite e pesi.

Le **antenne fisse** da *top floor* investono tipicamente gli spettri di frequenza nelle bande X, Ku, Ka e Q. Le antenne sono a riflettore solido in fibra di carbonio (classe 0.6-2 m) e le tecnologie più usate sono quelle del *Thick shell*, *Thin shell*, (membrane triassiali con *sandwich* di *honeycomb*) e superfici selettive in frequenza. Anche per i riflettori dispiegabili solidi si affiancano le tecnologie dei meccanismi e dei sistemi di illuminazione.

Le **antenne ripuntabili** a fascio fisso o variabile, tipicamente per le comunicazioni in banda X, Ku o Ka, consentono di aumentare la flessibilità dei *payload* di comunicazione. I prodotti più in uso sono antenne, a singolo o doppio riflettore, con movimentazione su due/tre assi e ripuntamento

del fascio tramite *steering* meccanico del solo riflettore principale o di tutta l'antenna. Le antenne a tre assi offrono una flessibilità in più in quanto consentono, oltre allo *steering*, la rotazione di un fascio ellittico, permettendo di aumentare la riconfigurabilità di copertura. L'esigenza di aumentare la flessibilità dei sistemi di comunicazione porta ad una evoluzione verso la movimentazione a quattro assi, permettendo di realizzare anche la funzione di *zoom* (fascio ellittico allargato e/o circolare). Nel medio-lungo termine l'evoluzione è verso antenne a riflettore alimentate da schiere di illuminatori con amplificazione distribuita allo scopo di disporre di ulteriore flessibilità nel *payload* (riconfigurabilità di coperture, potenza disponibile per singolo canale per *beam*).

Le **antenne ad *array*** diretto passivo sono usate a frequenze relativamente basse (UHF/L/S) fino alla banda X. A frequenze più alte sono primariamente usate come *board* radianti di antenne attive. Alla tecnologia degli *array* dispiegabili si affiancano le tecnologie dei meccanismi, tipicamente ADM (*Antenna Deployment Mechanism*) e HRM (*Holdown e Release Mechanism*). Si possono prevedere, nel medio termine, ricerche nel campo dei materiali e processi per realizzare *board* radianti di antenne attive a bassissime perdite e compatibili con integrazione di reti formatrici di fascio passive a doppia polarizzazione in tecnologia "*suspended*" fino all'interfaccia dell'elemento attivo.

Le **antenne attive** per applicazioni TLC satellitari abbracciano una vasta gamma di configurazioni: multi fascio riceventi con capacità anti disturbo, trasmittenti e riceventi ed antenne multifascio ripuntabile elettronicamente, a riflettore con schiere di illuminatori ad amplificazione distribuita e *front end* integrati ed infine *phased array* in banda Ku e Ka per terminali di comunicazione.

Antenne per l'Osservazione della Terra

Gli sviluppi si sono concentrati nelle antenne attive ad *array* diretto e pannelli dispiegabili allocati sui pannelli laterali del satellite o su riflettori dispiegabili alimentati con *feed array* attivi, in entrambi i casi per applicazioni di tipo Radar ad Apertura Sintetica (SAR).

I *phased array* diretti, hanno amplificazione distribuita con centinaia di moduli T/R, in singola e/o doppia polarizzazione, e realizzano un fascio Tx/Rx a scansione elettronica in uno o entrambi i piani principali d'apertura (*along track* e *cross track direction*).

Nel breve-medio termine sono previste evoluzioni rivolte alla riduzione della massa complessiva, alla riduzione dei costi, con configurazioni di antenna ancora più integrate rispetto alle attuali attraverso lo sviluppo di moduli T/R con un numero ridotto di dispositivi e al miglioramento dell'efficienza complessiva dell'antenna (efficienza degli amplificatori, del sistema di alimentazione). In questa classe rientrano le tecnologie abilitanti relative ai moduli T/R a larghissima banda, elevata potenza (>16w per modulo) ed alta efficienza (>35%) necessari a realizzare delle mattonelle radianti con elevata capacità di scansione (+/-30°) ed elevata densità di potenza (>2000w/m^2). In parallelo si è evidenziata la necessità di soluzioni basate su SSPA (amplificatori di potenza allo stato solido) in grado di fornire potenze RF di picco dell'ordine dei 150÷200W, da utilizzare insieme ad *array* diretti passivi alimentati per righe, così da ottenere sistemi di medie prestazioni ma compatti e leggeri da utilizzare su satelliti di classe medio/piccala (< 500kg).

Nel medio-lungo termine si prevede un aumento della flessibilità dell'antenna tramite l'utilizzo contemporaneo di più fasci e forme d'onda. Questo richiede la realizzazione di tecniche di "*Digital*

Beam Forming" (DBF) sia in ricezione che in trasmissione. Le tecniche di DBF prevedono, sostanzialmente, la riduzione del "*front-end*" analogico al solo modulo T/R spostando tutta le funzioni relative alla equalizzazione e calibrazione dei canali e alla formazione (anche adattiva) del fascio in un *back-end* digitale. L'utilizzo delle tecniche di DBF richiede lo sviluppo di tecnologie abilitanti quali: la conversione A/D e D/A a larga banda e a bassi consumi; lo sviluppo di nodi di calcolo (processori di canale e di RADAR) ad alta velocita' e basso consumo; *bus* e protocolli per trasferimento dati ad elevata capacità.
Per le grandi antenne a riflettore fino a 5/6 m di diametro, si dovrà investire nelle tecniche di dispiegamento con lo sviluppo di meccanismi *ad hoc* e nelle tecnologie composite leggere ad alta rigidezza. Le configurazioni con riflettori *unfurlable* classe 9-15 m, adatte a SAR in banda P,L,S o C, prevedono avanzamenti tecnologici per ridurre la massa e migliorare l'accuratezza dimensionale della *mesh*, nonché sistemi meccanici/elettronici per il controllo accurato del puntamento.

Antenne per la Navigazione

I *payload* di navigazione di nuova generazione dovranno soddisfare requisiti di E*ffective-Isotropic-Radiated*-Power (EIRP) e possibilmente ri-configurabilità in termini di potenza e copertura causati della variazione in tempo reale dell'angolo del satellite indotta dalla dinamicità dell'orbita. In questo scenario, saranno necessarie nuove architetture di antenna (ad es. antenne attive, *switchable beam antennas, zooming antennas*) per soddisfare questi requisiti impegnativi.
Le nuove tipologie di antenne si basano quindi sulla tecnologia delle antenne planari a *patches* o PEC o CUP con l'utilizzo di reti formatrici di fascio a bassa perdita. Si caratterizzano per l'alta stabilità di fase e del *transit time* durante la vita operativa ed il diagramma di radiazione realizzato è isoflusso e non, per provvedere una intensità costante di densità di potenza a terra. Uno *spillover* sviluppato recentemente di tali configurazioni è rappresentato dalle antenne per la radio occultazione operanti su segnale GPS di satellite.

Antenne per la Scienza

Le antenne di telecomunicazione per l'esplorazione planetaria sono antenne a riflettore ad alto guadagno, operanti nella banda X e Ka in polarizzazione circolare doppia per problemi di ridondanza. Un sistema completo di antenne per missioni scientifiche prevede, oltre all'antenna ad *alto guadagno* per la trasmissione dati con la terra, una o più antenne a *medio guadagno*, ripuntabili meccanicamente o elettronicamente, per il collegamento con sonde dedicate calate su lune locali del pianeta. I requisiti principali per antenne scientifiche sono fortemente dipendenti dalla missione. In generale la configurazione e la tecnologia dell'antenna deve tener conto delle condizioni operative durante il viaggio e sul pianeta (temperature, plasma, ecc...), nonché dei severi limiti di ingombro, di massa di potenza e dei carichi al lancio. È possibile che per missioni specifiche l'antenna debba essere multifunzione e multibanda. Tali antenne devono essere a bassissima massa (sotto i 2 Kg/m^2) ed ad altissima stabilità dimensionale per rendere compatibile la larghezza di fascio con l'accuratezza di puntamento del satellite in orbita. Le antenne in banda Ka, ad esempio, sono molto sensibili anche a piccole deviazioni termoplastiche del riflettore in orbita.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

L'evoluzione dei sistemi satellitari nei diversi segmenti applicativi dalle telecomunicazioni all'osservazione della terra, dalla navigazione all'esplorazione planetaria rappresentano la motivazione principale per il mantenimento e lo sviluppo della capacità di concepire, progettare e produrre sistemi di antenna complessi che inferiscono direttamente nel servizio .

Le antenne per telecomunicazione a bordo di satelliti richiedono prestazioni e funzioni sempre più spinte in termini di efficienza, di riuso di frequenza e di apertura (purezza di polarizzazione) e non ultimo in termini di peso. Avendo, inoltre, il sistema antenna un forte impatto sull'intero sistema satellite, tutti i *leader* del settore mantengono una completa capacità tecnica produttiva e competitiva in questo campo. Per poter far fronte a tale competitività l'unica via è proporre soluzioni innovative con prestazioni sempre più spinte e che consentano di far fronte alla contrazione dei tempi di reazione richiesti dal mercato. Ciò è possibile solo se si possiedono elevate capacità progettuali, competenze e strumenti di progetto (HW e SW) all'avanguardia.

Nell'ambito dell'osservazione RADAR ad altissima risoluzione (ad es. SAR terza generazione) è necessario garantire risoluzioni sub metriche attraverso segnali con bande molto larghe e tali da consentire un'ampia versatilità d'impiego (modi STRIPMAP, SPOTLIGHT). All'interno di questa classe di sensori si devono distinguere i prodotti orientati all'altissima risoluzione per applicazioni di difesa/sicurezza in cui si massimizza la prestazione "risoluzione" privilegiando l'utilizzo dei modi SPOTLIGHT e STRIPMAP. Una seconda sottoclasse comprende quei sistemi, per applicazioni sicurezza, civile istituzionale, commerciale e scienza, orientati alla ottimizzazione della prestazione "*swath*/risoluzione" (es. *Maritime Surveillance*). In entrambi i casi la disponibilità di "sistemi antenna" avanzati risulta fondamentale per il mantenimento di un rapporto prestazioni/prezzo tale da garantire la permanenza sul mercato del prodotto nazionale.

In generale, i temi di ricerca evidenziati sono necessari per sostenere la competizione, supportare e sviluppare la partecipazione dell'industria italiana ai più importanti programmi commerciali ed istituzionali in cui verranno impiegate le antenne descritte.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

In Italia lo stato dell'arte è di livello molto elevato con ragguardevoli progressi sviluppati nell'ultimo triennio nel settore delle antenne riconfigurabili e delle antenna attive per sistemi SAR satellitari. Aziende USA e francesi sono attive in questo campo e possiedono tecnologie parimenti avanzate.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 9

TECNOLOGIE DI MINIATURIZZAZIONE EQUIPAGGIAMENTI PER MICROSATELLITI, PAYLOAD COMPATTI (SENSORI E CAMERE PER L'OSSERVAZIONE DELLA TERRA) E RELATIVE APPLICAZIONI DI EMERGENZA

Negli ultimi anni i **micro** (10kg < m < 100kg) ed i **mini** (100kg < m < 400kg) satelliti sono diventati sempre più interessanti dal punto di vista industriale, grazie al loro minor costo di sviluppo, alle piccole dimensioni ed a tempi di realizzazione ridotti.

Il settore dei micro e mini satelliti, da tempo monitorato anche attraverso studi di settore ed analisi di mercato, si prospetta in forte espansione, sia relativamente al numero di piattaforme che saranno lanciate fino al 2022 (vedi Figura 9.1), sia per l'incremento delle loro applicazioni in ambito commerciale (vedi Figura 9.2).

Spaceworks Enterprises Inc, una società di consulenza americana specializzata nel campo aerospaziale, sin dal 2008 segue a livello globale le attività di lancio di micro/mini/nano satelliti e dal 2011 pubblica annualmente una dettagliata analisi di mercato che evidenzia una significativa crescita, in particolar modo nella categoria dei **nano-satelliti** (1-10Kg), per i quali la tendenza alla miniaturizzazione si presenta particolarmente vantaggiosa, così come la possibilità di poterli lanciare con costi contenuti.

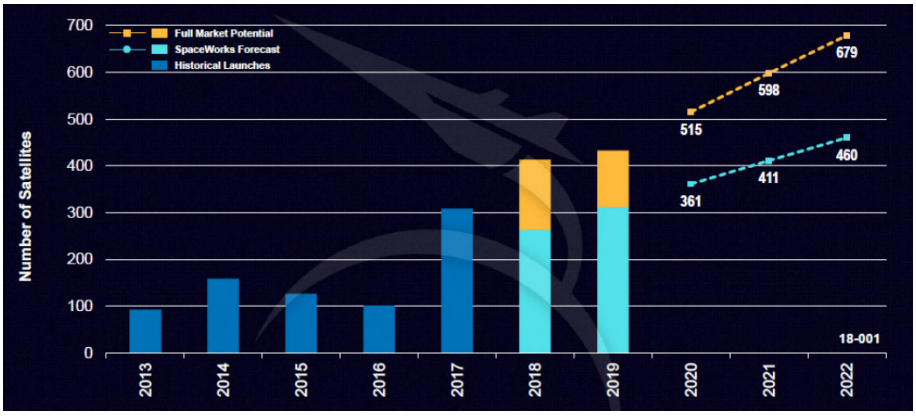


FIG. 9.1 PROIEZIONE AL 2022 DI LANCIO DI NANO E MICRO-SATELLITI (CREDIT SPACEWORKS)

I mini e micro satelliti, inoltre, rappresentano uno strumento flessibile, con un gran ventaglio di potenziali applicazioni: dal monitoraggio della Terra per avere una risposta rapida in caso di improvvise crisi su varie scale geografiche – ad es. terremoti, inondazioni, stabilità morfologica, devastazioni da fattori multipli, incendi, ecc... - a veri e propri satelliti per *Earth Observation*, a formazioni di satelliti con *payloads* distribuiti per utilizzo scientifico, civile o militare.

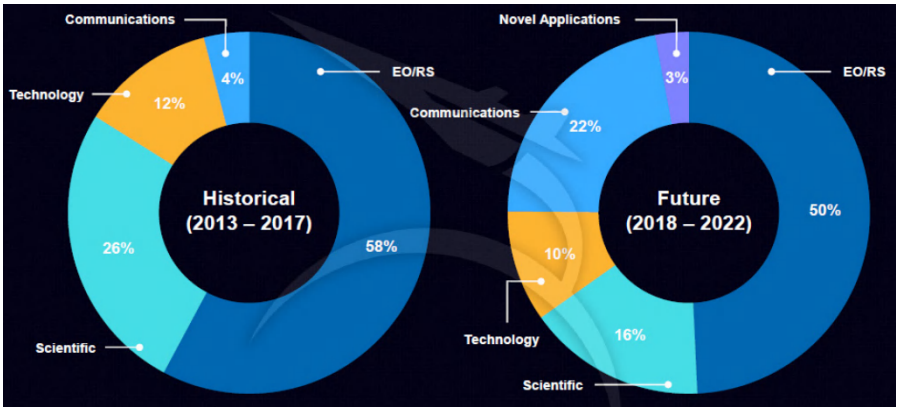


FIG. 9.2 FUTURI TRENDS DI APPLICAZIONE DI NANO E MICRO-SATELLITI (CREDIT SPACEWORKS)

L'impiego di una classe di satelliti medio piccola apre la strada alla possibilità di dispiegare un numero di risorse maggiore di quello utilizzato nei grandi sistemi attualmente esistenti (COSMO-SkyMed) o in via di realizzazione (COSMO Seconda Generazione, PRISMA) ottenendo così un drastico miglioramento della velocità di risposta nei casi di "crisi".
Il *trade-off* naturale che viene eseguito tra dimensioni dello *spacecraft* e sua funzionalità, a causa dei progressi tecnologici di **miniaturizzazione** e di **integrazione**, sta via via perdendo di significato. Sono già disponibili, o in fase avanzata di sviluppo, strumenti di osservazione a microonde per micro/mini satelliti e nano satelliti, architetture distribuite, **camere iperspettrali** a media risoluzione e ad infrarossi termici (per applicazioni e servizi in ambito di emergenze), sensori stellari e di sole miniaturizzati (**sensori di assetto *"on-chip"***), mini CMG (*Gyro Control Mode*), ecc... Sono anche in via di definizione e sviluppo nuovi algoritmi e servizi per la gestione e l'analisi dei dati ottenuti dai nuovi sensori. Va infine considerata la grande potenzialità delle **costellazioni di piccoli satelliti**, per moltiplicare il tempo di rivisita (passando da frequenza settimanale ad oraria, anche grazie alla capacità di ripuntamento dei satelliti), oppure per **frazionare il *payload*** su piattaforme diverse, ciascuna delle quali rimane in questo modo nell'inviluppo di massa della classe 'mini' (missioni distribuite ed integrate).

Applicazioni del dato satellitare utili in casi di emergenza

Nella Tabella 9.1 sono riportate, divise per tipo di rischio, alcune applicazioni derivate dall'elaborazione di dati satellitari, acquisiti mediante sensori ottici e radar. Viene indicata, per ogni applicazione, la fase del ciclo di vita dell'emergenza (***Preparedness:*** fase che precede l'emergenza, ***Response:*** ha inizio e conclusione corrispondente al verificarsi dell'emergenza, ***Recovery***: ripristino della normalità, ***Mitigation*** – fase in cui si attuano le misure adeguate affinché l'emergenza non si verifichi nuovamente) e il **tempo di rivisita** utile.
Si comprende come i sistemi satellitari debbano rispondere in maniera rapida alle emergenze e garantire una elevata frequenza temporale delle acquisizioni.
Questa esigenza viene soddisfatta mediante la realizzazione di piccoli satelliti, in quanto a basso costo e facilmente organizzabili in **costellazioni**.

RISCHIO	FASE DEL CICLO DI EMERGENZA	APPLICAZIONE	TEMPO DI RIVISITA
TERREMOTI	Response	Stima del danno ad infrastrutture ed edifici	due volte/giorno o più di frequente
	Response	Mappa aree danneggiate	due volte/giorno o più di frequente
	Preparedness/Responce	Stima movimento del suolo	due volte/giorno o più di frequente
	Mitigation	Mappe aree a rischio sismico	annuale/mensile
VULCANI	Preparedness/Response	Emissione di gas (altezza estensione e volume)	3 - 6 ore
	Preparedness/Responce	Temperatura del Cratere	3 - 6 ore
	Response	Emissione di Lava	3 - 6 ore
INONDAZIONI/ALLUVIONI	Response	Stima del danno ad infrastrutture ed edifici	due volte/giorno o più di frequente
	Response	Estensione e localizzazione dell'area alluvionata	due volte/giorno o più di frequente
	Response	Rilevamento rapido dell'area alluvionata	due volte/giorno o più di frequente
FRANE	Response	Stima del danno ad infrastrutture ed edifici	due volte/giorno o più di frequente
	Response	Estensione e localizzazione dell'area danneggiata	due volte/giorno o più di frequente
	Mitigation/Preparedness/Response	Mappe di rischio (es. deforestazione, erosione del suolo	annuale/mensile
FUOCHI	Response	Mappe aree bruciate	due volte/giorno o più di frequente
	Preparedness	Rilevamento fuochi	5 - 15 min
	Mitigation / Preparedness	Monitoraggio della vegetazione, mappe aree rischio incendio	24 ore
RISCHIO INDUSTRIALE (Terra)	Response	Identificazione area inquinata ed estensione	due volte/giorno o più di frequente
	Response/Recovery	Stress ambientale	1 volta/settimana
RISCHIO INDUSTRIALE (Mare)	Preparedness	Identificazione area inquinata ed estensione	due volte/giorno o più di frequente
	Recovery	Valutazione impatto (Qualità delle acque)	2 volte/settimana

TAB. 9.1 APPLICAZIONI DERIVATE DALL'ELABORAZIONE DI DATI SATELLITARI DIVISE PER TIPO DI RISCHIO (CREDIT THALES ALENIA SPACE).

MOTIVAZIONE PER LO SVILUPPO

In un tale contesto, i sistemi spaziali di **Osservazione della Terra** (OT) possono giocare un ruolo chiave, fornendo osservazioni sistematiche anche su grande scala.

Il ruolo strategico dell'Osservazione della Terra dallo spazio per il monitoraggio delle emergenze ambientali e come sistema di supporto alle decisioni, è stato da tempo riconosciuto a livello mondiale.

Dal punto di vista dei sensori, il settore dell'osservazione della Terra è stato interessato dall'evoluzione tecnologica in corso sulla miniaturizzazione della sensoristica e sullo sviluppo di dispositivi meccatronici sempre più compatti e in grado di operare autonomamente per lunghi periodi di tempo solo negli ultimi 2 anni, e in seguito a questo si è verificata una vera e propria proliferazione di piccoli satelliti (micro e *cubesat*) dediti alla OT.

Allo stesso tempo si osserva una pervasiva diffusione di dispositivi *Micro Electro-Mechanical Systems* (MEMS), motivata in gran parte dall'integrazione di sensori di movimento, luce e temperatura in *smartphones* e *tablets*, che rende il prezzo di questi dispositivi sempre più basso.
È quasi giunta a maturazione la cosiddetta *Internet* delle cose, con il drastico abbassamento del prezzi dei *transponder wireless* (*Wi-Fi* in primis) e la conseguente facilità di distribuire le reti di sensori su ampia scala geografica con costi estremamente bassi.
È facile fare un confronto di prospettiva con quanto accaduto per i dati di localizzazione. L'abbassamento dei prezzi dei dispositivi *Global Navigation Satellite System* (GNSS) ha permesso la loro integrazione nelle auto e la disponibilità di questa enorme massa di dati di geo-localizzazione permette di ricavare predizioni di traffico sempre più attendibili che vengono utilizzate per proporre servizi aggiuntivi agli utenti.
In modo simile la disponibilità di dati quali temperatura, umidità, irraggiamento solare può servire per iniziare a costruire modelli di correlazione sempre più efficaci, e predittivi, per la stima di parametri di interesse per l'agricoltura, l'ambiente e la protezione civile.
Per fare questo è necessario poter archiviare l'informazione dei sensori; normalizzare i dati degli stessi per tenere conto delle variabilità di costruzione, errori di misura, ecc...; indicizzare i dati dei sensori per poterli recuperare su base geografica, temporale, tipologia ecc...; sviluppare sistemi di analisi multi-dimensionali sempre più efficaci e, non da ultimo, integrare il tutto con i dati di osservazione della Terra.
È altresì necessario, particolarmente per un Paese come l'Italia, sviluppare nuovi sensori in grado di meglio "misurare" la variabilità e le specificità dei nostri territori; il primo settore da considerare è la **integrazione tra satellite e piattaforme** *Unmanned Aerial Vehicle,* (UAV), e sensori *in-situ* "compatibili". La spettroscopia ad alta risoluzione spettrale, ad esempio, è uno dei settori meno esplorati, ma non per questo meno promettenti. In Italia sono presenti delle eccellenze sia industriali (Leonardo) che scientifiche che stanno portando, per esempio, alla realizzazione della missione iperspettrale PRISMA e all'uso dei suoi prodotti.
Sarà necessario sviluppare tecniche di elaborazione in tempo reale sempre più veloci e sofisticate e sarà necessario poter sincronizzare, in modo pressoché automatico, i voli di dispositivi di tipo UAV con le acquisizioni satellitari.
Inoltre un'importanza sempre maggiore sta ricoprendo, e ricoprirà, la capacità di elaborazione direttamente a bordo dei dati satellitari acquisiti dal *payload*.
Tale capacità è praticamente necessaria in tutti quegli scenari applicativi in cui la reattività del satellite verso fenomeni imprevisti o il suo tempo di risposta nel gestire il normale *workflow* operativo del satellite risulta essere di primaria importanza; e questo è evidente nell'ambito delle applicazioni di gestione delle emergenze.
Infatti, grazie al processamento a bordo, il satellite permette di poter estrarre solo e soltanto le informazioni utili, gli *analytics*, nel minor tempo possibile, senza inviare a terra tutto il dato di *sensing*, eliminando eventuali colli di bottiglia come la quantità di memoria a bordo del satellite, la banda del canale trasmissivo, la visibilità delle stazioni di terra.
Inoltre, grazie a tale capacità, ogni singolo utente potrebbe chiedere *task* di acquisizione, totalmente personalizzati in termini di *processing*, così da poter ottenere solo le informazioni, e non

i dati, di proprio interesse. Ad esempio, la guardia costiera potrebbe essere interessata solo alle chiazze di petrolio in mare, invece che al dato radar relativo. E potrebbe quindi ordinare il servizio di "*oil spill detection*" invece che il dato SAR.
Lo sviluppo di tale capacità ha impatti sui processori di bordo, sulle architetture, sui processi operativi delle missioni e sugli algoritmi di elaborazione.
Tra le tecnologie innovative abilitanti di questo ecosistema ricadono:

- gli algoritmi di *Artificial Intelligence* basati su *Machine Learning* e *Deep Neural Network*, da affiancare all'algoritmica classica di elaborazione dei dati satellitari, da rendere però compatibili con l'ambiente spaziale;
- le piattaforme di *processing* ad alte prestazioni come *Graphics Processing Unit* (GPU) e *Video Processing Unit* (VPU) ad oggi non esistenti per l'ambiente spazio;
- le tecnologie e le architetture basate su *Blockchain* che rendono possibile, attraverso l'attivazione degli *Smart Contracts,* la completa automazione di tutto il *workflow* operativo e la messa a disposizione di ogni singola risorsa del satellite (ad es. memoria, *processing*, banda, tempo) come micro-servizi da attivare su richiesta.

Si dovranno sviluppare in parallelo tecniche di archiviazione e trattamento dei dati acquisiti da sensori Micro *Electro Mechanical Systems* (MEMS) posti su centraline fisse e su dispositivi *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV). Tali dati non saranno necessariamente omogenei per qualità (grado dei sensori, geo-localizzazione, tarature e invecchiamento) e sarà quindi necessario sviluppare algoritmi di armonizzazione totalmente nuovi.

Le ragioni che spingono, con urgenza, ad uno sviluppo nel dominio dei micro e mini satelliti sono essenzialmente cinque:

- dispiegare un sistema basato su una rete di micro/mini satelliti capace di soddisfare i requisiti di massima agilità ed immediata responsività in caso di improvvise crisi localizzate in particolari aree geografiche (crisi sia di tipo ambientali che politico/militari);
- avere dei costi di mantenimento ed aggiornamento ridotti senza per questo pagare in degrado di *performance*;
- stimolare la collaborazione di cooperazione tra centri di ricerca ed industria italiana in modo da rimanere competitivi nel dominio della tecnologia avanzata;
- possibilità di utilizzare sistemi di lancio da piattaforme aeree, con riduzione dei costi rispetto ai più tradizionali lanciatori;
- essere pronti e reattivi di fronte alle esigenze del mercato in vista dell'ingresso di nuovi attori/clienti del calibro di Google, Amazon, Facebook ed Apple.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Per capire quanto sia importante tentare di tenere il passo con il resto del mondo, basta osservare che la NASA dedica un report, "*Small Spacecraft Technology State Of The Art*" (https://sst-soa.arc.nasa.gov/), che viene aggiornato di continuo (ultimo *update* Settembre 2018) in cui descrive le tecnologie abilitanti per i piccoli satelliti (per la NASA con massa da 1kg a 500kg) per ognuno dei seguenti domini: piattaforma, potenza, propulsione, controllo di assetto e navigazione, strut-

tura, materiali e meccanismi, controllo termico, comandi e *data handling*, comunicazioni, integrazione, lancio e *deployment*, segmento di *ground* e *operations*, sistemi di de-orbitaggio passivi.
La miniaturizzazione (vedi MEMS), i processi e le tecniche di integrazione hanno fatto passi da gigante negli ultimi anni. L'avvento delle università nel mondo dei nano e pico satelliti ha poi fatto si che, accanto alla integrazione di mini satelliti con qualità e procedure di test paragonabili a quelle di grandi satelliti, si siano anche realizzati satelliti integrati direttamente nei laboratori universitari ed utilizzando **componentistica commerciale** *off the shelf*, talvolta anche non qualificata spazio. In Italia varie Università (Bologna, Roma, Politecnico di Torino) hanno acquisito una notevole esperienza con nano/pico satelliti, anche se i dati sul *rateo* di successo di questi satelliti non sono disponibili da fonti ufficiali. L'esperienza industriale, che sino a pochi anni fa si limitava ai mini satelliti **MITA** (anno di lancio 2000) ed **AGILE** (anno di lancio 2007) della allora Carlo Gavazzi Space ed a 2 micro satelliti della **MegSat** (anni di lancio 1999 e 2000), ha recentemente vissuto un'improvvisa impennata di interesse. Nel Dicembre 2017 l'ASI ha firmato con Sitael il contratto per la realizzazione del programma **PLATINO** (Mini Piattaforma spaziaLe ad Alta TecNOlogia), che prevede lo sviluppo di una piattaforma versatile e compatta per mini satelliti di meno di duecento chili. Il progetto è stato affidato al Raggruppamento Temporaneo di Imprese, costituito da Sitael (*prime*), Thales Alenia Space in Italia, Leonardo e Space Engineering. Thales Alenia Space e Telespazio hanno siglato un accordo di *partnership* con la società statunitense Spaceflight Industries per lo sviluppo di ***BlackSky***, una costellazione di 60 satelliti di osservazione della Terra di piccole dimensioni, che garantiranno tempi di rivisita molto brevi su ogni punto del pianeta. In SITAEL sono ad oggi presenti due famiglie di piccole piattaforme, nello specifico il micro-satellite S-75 (fino a 75kg al lancio, già in orbita con la missione ESEO) e il mini-satellite S-200 (basato sulla piattaforma di PLATiNO), dotata di propulsione elettrica e capace di imbarcare diversi strumenti (multi-applicabilità).
In Thales Alenia Space in Italia sono in via di sviluppo, da qualche anno, due versioni di piattaforma specializzata per mini/micro satelliti, **NIMBUS-S** per *spacecrafts* sino a 150kg, e **NIMBUS-H** per *spacecrafts* sino a 350kg. In parallelo si stanno sviluppando mini-CMG e schede integrate, oltre che a sensori ed attuatori dedicati esclusivamente a mini e micro satelliti. Si stanno inoltre implementando (HW e SW) schede multiprocessore di ultima generazione (qualificata spazio) per affrontare le tematiche di capacità di calcolo distribuite (su singolo satellite).
All'estero oltre alle università sono assai attive anche le industrie (ad es. Aerospace and Defence con mini satelliti per utilizzo militare - gli Essaim ed altri -, OHB con i mini satelliti Orbcomm per comunicazioni, SSTL con mini satelliti per OT, GHGSat per il monitoraggio delle emissioni globali, Planet per OT, Tyvak per OT, ecc...). Ci sono poi innumerevoli industrie specializzate nella costruzione e gestione di nano e micro satelliti (ad es. Planet, Spire, Spaceflight Industries che sarà partner di BlackSky, Tyvak, Clyde Space, ecc...) ed industrie che hanno aggiunto alla loro gamma anche sviluppo e qualifica di sensori specializzati per nano satelliti (ad es. Headwall Photonics Inc. per gli iperspettrali, Harris, ecc...). Infine GHGSat fornisce un esempio di collaborazione tra Università (Toronto e Waterloo), governo (Canada) e privati (Xiphos Systems Corporation, MPB Communications Inc. e Headwall Photonics Inc.), capace di lanciare un mini satellite (Claire) nel 2016 come dimostratore tecnologico (tuttora funzionante), a meno di 3 anni dalla costituzione

della società, ed a prevedere il lancio dei primi satelliti (classe < 15kg) della propria costellazione per il 2019.

Dal 2012 al 2017 sono stati lanciati oltre 1.000 piccoli satelliti, e nel 2017 ne sono stati lanciati sei volte di più che nel 2012. Dal 2012 al 2017 sono stati lanciati oltre 700 *cubesat*, che stano diventando la componente dominante dei piccoli satelliti in orbita. Il 52% di tutti i piccoli satelliti per il *remote sensing* della Terra sono proprietà dell'azienda americana Planet, al momento *leader* del mercato di micro satelliti e *cubesat*; le aziende americane da sole hanno inoltre detenuto il 90% dell'intero mercato dei piccoli satelliti nel 2017.

La disponibilità di *power* per i piccoli satelliti non è un problema, grazie alle celle solari a tripla giunzione e con basso peso specifico (circa 85 mg/cm^2), che arrivano ad efficienze del 30% (33% per SolAero), ed alle batterie a ioni di litio con performance di circa 200 W*hr/kg (si stanno studiando anche batterie al litio fosfato e litio polimero). In questo dominio l'Italia è ben posizionata rispetto al resto d'Europa ed agli Stati Uniti.

La propulsione dedicata ai mini satelliti è un settore in rapida espansione, e negli ultimi anni ha raggiunto un discreto livello di maturità. Si va dai *thrusters* a gas a quelli al plasma, dalla propulsione chimica basata sui *green propellant* a quella elettrica (varie tipologie). C'è infine la propulsione con *thrusters* colloidali, che attualmente è dominio esclusivo degli Stati Uniti; è in sviluppo anche un sistema di propulsione specifico per micro satelliti basata su acqua (Tethers Unlimited, TRL 6+). In Europa ci sono vari costruttori specializzati sia nella propulsione chimica che in quella elettrica. In Italia ci sono solide competenze per quanto riguarda la propulsione chimica e la propulsione a gas freddo (*cold gas*). Per quanto riguarda la propulsione elettrica, inoltre, l'Italia vanta una posizione di *leadership* per tutte le possibili varianti, avendo sviluppato tutti gli equipaggiamenti necessari: motori, scatole di gestione e controllo della potenza e componenti fluidici, ma anche camere di prova e diagnostica.

I **sensori** e gli **attuatori** per il controllo di assetto di micro e mini satelliti stanno beneficiando dei progressi tecnologici in termini di processi e materiali, che hanno permesso la miniaturizzazione e l'integrazione di più sensori e la disponibilità di nuovi dispositivi per l'*imaging*, di maggior potenza di calcolo e di algoritmi innovativi. Si pensi che su nano satelliti della classe ***CubeSat*** gli *Star Tracker* possono avere errori ben inferiori ad 1°, mentre per micro e mini satelliti si può scendere ampiamente sotto 0.1°. In Italia ci sono competenze specifiche sia per i sensori che per gli attuatori, e ci sono studi avanzati per sensori ed attuatori ad alta performance. In Europa, e nel resto del mondo, ci sono sviluppi tecnologicamente molto innovativi.

Le capacità delle piattaforme per *Cubesat* hanno raggiunto un altissimo livello tecnologico, come si può verificare leggendo la sottostante Tabella 9.2.

Una tecnologia fortemente innovativa su cui il mondo industriale e della ricerca americano, coinvolto nella progettazione e realizzazione degli "*small satellites*", sta investendo è rappresentata dall'*Additive Layer Manufacturing* (ALM). Questa tecnica di fabbricazione offre due principali vantaggi: il significativo abbassamento dei costi di produzione derivante dall'assenza di attrezzi e stampi, dalla completa automazione del processo e la possibilità di integrare, all'interno della struttura (metallica o termoplastica), sensori e/o componenti direttamente durante la fase di realizzazione, riducendo dunque anche notevolmente i tempi di lavorazione. Un'ulteriore esten-

sione applicativa di tale tecnologia ricade nello sviluppo di microsistemi propulsivi. NASA Glenn Research Center e Northrop Grumman hanno recentemente avviato studi congiunti sull'integrazione di sistemi micro-propulsivi all'interno di strutture *small satellite* realizzate in 3D printing. Tethers Unlimited offre soluzioni ottenute con il 3D printing per la realizzazione di pannelli che rispondono ai requisiti di "*structural multi-layer insulation*".

MANUFACTURER	S/C DIMENSIONS (MM)	P/L VOLUME / MASS (U/KG)	P/L POWER (W) - ORBIT AVERAGE	POINTING CONTROL	POINTING ACCURACY	TRL
AAC-CLYDE (1U)	113X100X100	0.2U	2	< 5°	0.020°	9
AAC-CLYDE (3U)	227X100X100	1.5U	> 12	< 0.1°	0.005°	9
AAC-CLYDE (6U)	227X100X100	4.4U	> 24	< 0.05°	0.002°	9
ADCOLE MARYLAND AEROSPACE 3000 (3U)	100X100X300	4 KG	> 12	0.1°	0.01°	CONTACT VENDOR
ADCOLE MARYLAND AEROSPACE 6000 (6U)	100X200X300	12 KG	> 20	0.1°	0.01°	CONTACT VENDOR
INNOVATIVE SOLUTIONS IN SPACE (3U)	100X100X300	2 KG	> 2	10°	N/A	9
NANOAVIONICS M6P (6U)	380.1X18.87X236	7.5 KG	N/A	1°	0.8°	9
BLUE CANYON TECHNOLOGIES LLC XB3 (3U)	100X100X300	1.5 KG	6.3	0.002°	0.002°	9
BLUE CANYON TECHNOLOGIES LLC XB6 (6U)	100X200X300	1.5 KG	6.3	0.002°	0.002°	9
BLUE CANYON TECHNOLOGIES LLC XACT	100X100X500	0.91 KG	2.6	0.003° FOR TWO AXES, 0.007° FOR THIRD AXIS	0.003° FOR TWO AXES, 0.007° FOR THIRD AXIS	9

TAB. 9.2 SPECIFICHE DI PIATTAFORME PER NANO-SATELLITI (CREDIT THALES ALENIA SPACE)

Per quanto riguarda gli strumenti, il discorso è complesso visto il numero di attori presenti sul mercato internazionale. Esistono infatti molti ***payload*** di taglia idonea per micro satelliti anche se la maggior parte sono stati sviluppati per missioni internazionali di tipo planetario (es: missioni Cassini e Rosetta) dove, per il fatto stesso che le sonde trasportano usualmente un numero significativo di strumenti, lo spazio e massa allocabili ad ognuno è sempre piuttosto ridotto.

Un esempio è costituito dallo strumento **SIMBIO-SYS**, sviluppato dall'industria italiana (Leonardo) in collaborazione con *team* di scienziati italiani, che farà parte del *payload* per la Missione Bepi Colombo verso il Pianeta Mercurio. La testa ottica, che pesa solo 11.5kg, integra tre differenti strumenti: una camera *High spatial Resolution Imaging Channel,* (HRIC), ad alta risoluzione, uno spettrometro *Visible and Infrared Hyperspectral Imager channel* (VIHI) e una stereo camera *multispectral STereo Channel* (STC).

Questo strumento, pur avendo le prestazioni richieste per una missione planetaria, può essere ancora migliorato per poter essere dedicato con efficacia all'osservazione della Terra, in ragione della diversa quota orbitale dalle aree osservate.

L'adattamento di questo specifico strumento dall'osservazione planetaria a quella terrestre è realizzabile anche per altre classi di strumenti.

Per ottenere buone prestazioni, con piccole dimensioni, bisogna progettare con criteri *ad hoc*, eli-

minando ad esempio le classiche ridondanze della strumentazione spaziale e utilizzando tecnologie innovative e allo stato dell'arte.
Esempi di queste tecnologie sono gli "**spettrometri-*on-a-chip***" realizzati integrando direttamente filtri ottici con rivelatori elettronici (tecnologia su cui anche in Italia si sta conducendo ricerca di punta) o l'uso di ottiche a specchi direttamente lavorate con tecniche a controllo numerico su meccaniche ultraleggere in alluminio o materiali simili. Per l'elettronica esistono già strumenti ad esempio *Highly Integrated Pluto Payload System* (HIPPS), della NASA per missione PLUTO EXPRESS) che incorporano microprocessori direttamente nelle pareti dello strumento, eliminando dunque le schede elettroniche convenzionali.
La diffusione su scala mondiale delle piattaforme satellitari per acquisire, gestire e trasmettere immagini e dati sempre più fitti e voluminosi spinge verso lo sviluppo di ***Digital Signal Processor*** (DSP) di nuova generazione, in grado di svincolare il sistema orbitale che lo integra dagli attuali limiti operativi, dettati essenzialmente dalle contenute dimensioni, masse e consumi energetici. Il superamento di questi limiti attuali costituisce l'imprescindibile passo in avanti per la creazione di un sistema di monitoraggio integrato, con altre piattaforme (per es. aeronautiche tipo UAV) ed il segmento di terra, capace di collezionare e mettere a disposizione dell'utente finale le misure ed i rilevamenti effettuati con la frequenza e la risoluzione richieste.
L'integrazione con sensori in situ è da sempre un aspetto cruciale per garantire un uso efficace dei dati di osservazione della Terra.
In questo ambito relativamente poco è stato fatto su base sistematica, se si escludono i grossi programmi di osservazione dei cambiamenti climatici (oceani e atmosfera) ed altre sporadiche applicazioni di nicchia su base locale (ad es. i vigneti in zone di particolare pregio e vocazione). Manca un coerente programma per l'utilizzo integrato delle informazioni satellitari e dei dati misurati dai sensori ambientali.

Planetek Italia ha un programma di sviluppo di un ecosistema software integrato bordo-terra, basato su ***SpacePDP*** (*Payload data Processing*), sull'**AI** e sulla ***Blockchain***, con cui rendere operativo il paradigma chiamato ***SpaceStream***. L'obiettivo dello *SpaceStream* è superare la classica distinzione tra segmento spazio e segmento terra e rendere quindi possibile l'interazione automatica, via *blockchain*, tra i diversi attori dell'Internet of *Things*, come satelliti (uguali o totalmente diversi), UAV, *Hybrid Active Pixel Sensor* (HAPS) e in situ *sensors*, considerandoli come facenti parte di una costellazione di oggetti *Fixed* o anche *On Demand*.

"Space Segment" ed Emergenze

Il panorama che lo "*Space Segment*" oggi offre è particolarmente ricco, con missioni satellitari in orbita polare e inclinata, con sensori attivi e passivi operanti sull'intero intervallo spettrale della **banda ottica** (dall' Ultravioletto (UV) all'Infrarosso (IR) lontano) e nelle microonde (in bande X/C/L). Per quanto riguarda lo scenario internazionale, l'*International Charter* (IC) "*Space and Major disasters*" (http://www.disasterscharter.org/web/charter/home) è un'iniziativa sovranazionale, nata nel 2000, che vede ad oggi coinvolte tutte le maggiori agenzie spaziali mondiali, insieme ai principali attori industriali che gestiscono dati e missioni satellitari, che fornisce a richiesta, dati ed immagini satellitari in seguito ad un evento naturale estremo o ad un'emergenza

ambientale. Pur trattandosi di un servizio "a chiamata", le attivazioni sono andate sempre aumentando (attualmente il dato medio dell'ultimo quinquennio si è stabilizzato su un valore di circa 40 attivazioni/anno), a dimostrazione della sempre maggiore attenzione che gli utenti ed i decisori, preposti alla gestione delle emergenze, rivolgono al dato spaziale. Le richieste di attivazione dell'IC hanno riguardato praticamente tutti i principali rischi naturali, ambientali e tecnologici, con una prevalenza per, in ordine di numero di attivazioni, le alluvioni, i terremoti, gli incendi e le eruzioni vulcaniche.

Per quanto riguarda il contesto Europeo, l'*Emergency Management* è da sempre un settore sul quale i programmi europei si sono focalizzati e concretizzati anche attraverso l'investimento massiccio di ingenti risorse. Nell'ambito del programma **GMES** (*Global Monitoring for Environment and Security*) la tematica della gestione delle emergenze ha assunto da subito un ruolo cruciale, tanto da rientrare tra i primi *Fast Track services* previsti e finanziati dal programma. Con il passaggio da GMES a **GIO** (*Gmes Initial Operations*) e quindi all'attuale fase operativa prevista con **Copernicus**, l'*Emergency Management Service* (EMS, *emergency.copernicus.eu*) è sicuramente uno, tra i sei servizi *Core* previsti dal programma, tra quelli che si trovano già oggi in un'avanzata fase di maturità e che si avvia a diventare pienamente operativo nel prossimo settennio (sviluppo completo del programma Copernicus). Il GIO EMS, attualmente, fornisce i propri prodotti a richiesta ed opera in due diverse configurazioni principali, in *rush mode* e *non-rush mode*, a seconda della urgenza richiesta dall'utente che attiva il servizio. Dal 2012 ad oggi, il servizio ha fornito prodotti e mappe *Humanitarian OpenStreetMap Team* (HOT) in seguito a circa 100 richieste di attivazioni in totale, relative principalmente a richieste di supporto in seguito a calamità naturali di tipo idro-meteorologico, ad inondazioni e ad incendi (*www.emergency.copernicus.eu*).

Inoltre, la messa a disposizione d'informazioni aggiornate e frequenti sulla copertura del suolo e sull'uso del suolo (*Land Cover/Land Use* – mappa degli esposti) è sempre più importante non solo per la ricerca, ma anche per il monitoraggio dei cambiamenti ambientali, che avvengono sempre più repentinamente con conseguenze poco prevedibili al momento, e per la creazione di indicatori ambientali a sostegno delle politiche correlate.

A livello europeo, con la ***CORINE Land Cover*** (CLC), tutta una serie d'informazioni relative alla *land-use/land-cover* esiste dal 1990 (con aggiornamenti nel 2000 e nel 2006). Nel contesto di Copernicus, la *European Environment Agency* (EEA) sta attualmente implementando le componenti pan-europee e locali delle GMES/GIO *land* che includono la mappatura dei 5 *layers* ad alta risoluzione *High Resolution Layers* (HRL) e le caratteristiche della copertura del suolo. Gli HRLs sono parte di un *trend* volto all'ottenimento di prodotti *Land Use/Land Cover* (LU/LC) a maggiore risoluzione spaziale e temporale. Questo *trend* sarà in parte reso possibile dalla nuova disponibilità di dati *Earth Observation* (EO), ed in particolare con la prossima disponibilità dei dati di Sentinel-2.

Sia nel caso dell' *International Charter,* (IC), che del GIO EMS si tratta, però, di servizi sempre attivati ma non veramente guidati dagli utenti; essi cioè forniscono prodotti, immagini e mappe rilevanti, ottenibili con le tecnologie ad oggi disponibili che sono però state progettate e sviluppate senza un vero coinvolgimento della cosiddetta "*user community*". Per questo motivo le missioni attualmente operative non sempre soddisfano i requisiti specifici, spesso molto stringenti, che gli

utenti pongono quando si tratta di prendere, in tempi rapidi, decisioni che implicano conseguenze rilevanti sulla sicurezza dei cittadini e sulla salvaguardia dell'ambiente.

L'insufficiente coinvolgimento degli utenti finali nella progettazione e programmazione dell'*Earth Observation Space System* ha peraltro fortemente limitato, insieme alle politiche di accesso ai dati (spesso troppo complesse e poco sostenibili), la domanda di tecnologie spaziali da parte degli utenti istituzionali preposti al controllo ed alla gestione del territorio. Il ricorso ai dati ed ai prodotti satellitari da parte dell'utenza pubblica risulta pertanto ancora troppo disomogeneo, discontinuo e non strutturato, rendendo di fatto tali tecnologie ancora largamente sotto-utilizzate (anche rispetto agli investimenti significativi che la Commissione Europea (CE), ha sostenuto nell'ultimo decennio). Questa circostanza è peraltro riconosciuta implicitamente anche dalla Commissione Europea che, con il nuovo programma di ricerca ed Innovazione **Horizon 2020** prevede di apportare alcune azioni correttive, ad esempio attraverso lo "sviluppo di sistemi di osservazione e informazione ambientale ampi e sostenuti" che dovrebbero garantire "la fornitura dei dati e delle informazioni a lungo termine" attraverso la promozione di "un accesso libero, aperto e privo di restrizioni a dati e informazioni interoperabili" in particolare per quanto riguarda le "tecnologie e le infrastrutture di dati relative all'osservazione e alla sorveglianza della Terra in grado di fornire costantemente informazioni, stime e proiezioni tempestive e dettagliate" (EC, 2011). Inoltre il programma Horizon 2020 prevede esplicitamente di "Rafforzare la capacità unitaria di gestione delle catastrofi naturali o causate dall'uomo, rafforzando il monitoraggio delle infrastrutture e lo sviluppo di un'allerta precoce globale a impostazione multi-rischio nonché lo sviluppo di sistemi informativi di gestione del rischio, avvalendosi dei quadri di osservazione della Terra via satellite" *(EC-H2020 Work Program 2018-2010*).

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 10

TECNOLOGIE PER RADAR DA OSSERVAZIONE DELLA TERRA

DESCRIZIONE E MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

L'Osservazione del Terra attraverso sensori radar satellitari ha raggiunto oggi un altissimo livello di operatività. La capacità di osservazione in assenza di illuminazione solare (*day/night*) ed in presenza di copertura nuvolosa e la varietà di informazioni derivabili dalle immagini radar ha determinato il successo della tecnologia radar di immagine (*Synthetic Aperture Radar*, SAR), superando le difficoltà interpretative e la necessità di dedicato e complesso processamento dei dati. L'utilizzo in una molteplicità di applicazioni, dalla protezione civile, al monitoraggio dell'ambiente terrestre e marino, fino alla sorveglianza del territorio, è ampiamente esercitato da una grande varietà di utenti istituzionali, scientifici e commerciali, che hanno ormai maturato maggiore consapevolezza delle esigenze reali di osservazione e quindi opportunamente definito i requisiti operativi e prestazionali. Conseguentemente la classificazione della tipologia di strumenti è ormai legata alla specifica esigenza operativa e può essere così categorizzata:

- SAR ad uso duale, per osservazione di zone specifiche con altissima risoluzione e breve tempo di rivisita;
- SAR a media risoluzione e *larghe swath* per monitoraggio ambientale globale;
- SAR ad alta risoluzione e altissimo tempo di rivisita per sorveglianza ed *early warning*;
- tecniche di processamento per *Moving target*;
- tecniche di data fusion tra dati SAR multi-banda e con dati ottici *Very High Resolution* **(**VHR);
- tecniche di riconoscimento automatico dei target su immagini SAR (ATR – *Automatic Target Recognition*);
- *transponder* SAR attivi per monitoraggio accurato della stabilità degli edifici e delle infrastrutture.

SAR ad altissima risoluzione e basso tempo di rivisita su Aree Specifiche

SAR ad altissima risoluzione sono in grado di garantire **risoluzioni sub-metriche** attraverso l'impiego di bande molto elevate. Come noto il miglioramento della risoluzione è pagato con una diminuzione della superficie osservata, nelle tecniche di osservazione convenzionale (*Spot, Stripmap e SCANSAR*). Diversamente che in passato, oggi la richiesta di tali immagini ad altissima risoluzione è relativa ad ampie (>500km) aree specifiche della superficie terrestre, con continuità e con una frequenza temporale molto alta. L'effetto di questa richiesta porta un duplice effetto: la definizione della configurazione orbitale verso orbite inclinate che, opportunamente progettate, massimizzino le acquisizioni sull'area interessata e la richiesta di una altissima agilità per poter ripuntare l'osservazione della zona e fornirne un "mosaico" di immagini. Le capacità di S*teering* (ri-puntamento del fascio dell'antenna) diventano quindi un *driver* per questa soluzione: esse

implicano l'utilizzo di tecnologie di puntamento elettronico del fascio "*electronic steering*" e/o l'utilizzo di capacità di puntamento meccanico agile nella piattaforma. Nel primo caso l'evoluzione tecnologica è a carico dell'antenna "attiva" e alle capacità di *Beam Forming* adattivo dei componenti T/R (TRM, Moduli di Trasmissione/Ricezione). Nel secondo caso, la tecnologia coinvolta è nei sottosistemi di piattaforma (*Attitude Orbit Control System (AOCS),* ruote inerziali o *"Control Moment Gyro*" - CMG) che devono consentire un ri-puntamento veloce della piattaforma per acquisire immagini molto ravvicinate nel tempo e nello spazio che, come tessere di un mosaico, riescano a fornire una visione molto ampia e molto dettagliata dell'area in osservazione ad ogni singolo passaggio del satellite.
Questione a sé riguarda la continua domanda di migliorare la risoluzione geometrica: in tal caso l'evoluzione tecnologica è richiesta a carico sia dell'elettronica che dell'antenna a causa dalla necessaria evoluzione per la gestione di bande larghissime (es. dalla alta banda frazionale).

SAR a media risoluzione e larghe swath per Monitoraggio Ambientale Globale

Il cambiamento climatico e la gestione di fenomeni metereologici straordinari è diventato il tema principale delle politiche nazionali e mondiali. La Comunità Europea ha individuato nella Missione *Copernicus* lo strumento che lo spazio mette al servizio delle istituzioni e della scienza per fornire un monitoraggio preventivo ed operativo. L'attuale costellazione delle "*Sentinel*" vede quindi, in un futuro prossimo, un suo potenziamento sia come continuità operativa dei satelliti in volo, con prestazioni aumentate allo stato dell'arte, sia come espansione delle modalità di osservazione e di analisi. Strumenti di assoluta novità sono stati individuati e tra questi radar in grado di estendere l'area osservata senza pagare in termini di risoluzione spaziale.

All'interno di questa classe di sensori trovano posto i ***Multibeam*-SAR** che sono caratterizzati dalla capacità di gestione separata di differenti aree della medesima antenna, andando così a realizzare la contemporanea presenza di più fasci puntabili su aree di superficie differenti. Ulteriore caratteristica della categoria è quella di analizzare il segnale eco su differenti bande di ricezione (multi-banda), "semplificando" la gestione di segnali a larga banda.
I sistemi fanno uso di antenne planari ***"Phased Array"***, che permettano l'implementazione di un elevato numero di *beam*, ***"Digital Beam Forming"***, riconfigurazione dei fasci in volo e la partizione dell'antenna per l'impiego di modi speciali e, nel caso di radar a bassa frequenza (C, L, P), anche di antenne a riflettore che forniscano una superficie di decine di m^2 allo scopo di massimizzare la sensibilità dello strumento, con tecniche di elaborazione a bordo tipo "*SCan On REceive* (SCORE).
La realizzabilità di questo tipo di sistemi è subordinata alla disponibilità di nuove tecnologie abilitanti qualificate per lo spazio. Tali tecnologie risiedono:

- nella gestione separata di più fasci e/o di più partizioni di antenna che porta a dover progettare sistemi multi-canale;
- nella capacità di campionare ad alta frequenza (*high frequency Analog-to-Digital Converter*, ADC), eliminando la sezione di *up/down converter* RF che presenterebbero complessità di calibrazione intercanale troppo elevata;
- nella capacità di elaborazione di grosse moli di dati a bordo, con ovvie ricadute in termini di miniaturizzazione di trasmettitori e ricevitori, e con implicazioni molto sfidanti per le archi-

tetture delle unità digitali e per le prestazioni richieste ai nodi di calcolo;

- nell'evoluzione dell'architettura delle antenne attive e passive con l'implementazione di *Digital Beam Forming* su architetture on *Printed Circuit Board* (PCB) e con la realizzazione di grandi antenne multibanda a basso rapporto *stowed/deployed (Large Deployable Reflector)* in cui l'innovazione tecnologica risiede soprattutto nella meccanica di *deployement* e nel controllo termomeccanico attivo della superficie a *mesh*.

SAR ad Alta Risoluzione e altissimo tempo di rivisita per Sorveglianza ed Early Warning

La dimostrata capacità di ridurre sensibilmente la massa dei satelliti (*Microsat*) di osservazione SAR ha aperto la strada alla progettazione di costellazioni molto estese (>20 satelliti) allo scopo di fornire tempi di rivisita e capacità di osservazione di un ordine di grandezza superiore al passato. Sistemi di questo tipo, con qualità di immagine inferiore rispetto alle soluzioni standard, sono estremamente promettenti per la realizzazione di "sistemi di sistemi" in cui la costellazione micro fornisce il monitoraggio continuo, allo scopo di individuare zone di interesse sulle quali concentrare la successiva osservazione del sistema "*high performing*". Questo tipo di utilizzo sarà sicuramente operativo a breve termine, ma il successivo passo riguarderà certamente il miglioramento della qualità dell'immagine e delle prestazioni operative: la sfida tecnologica in tal senso ha diversi assi.

Il primo riguarda l'evoluzione delle antenne in cui la massa non può eccedere il 15% del peso del satellite, pur assicurando un'area efficace e una direttività opportuna. L'uso di *reflect-array* e tessuti a membrana sembra essere la soluzione più adeguata, così come dimostrato da alcune soluzioni americane.

Il secondo asse riguarda l'utilizzo dell'*additive manufacturing* per la realizzazione della struttura del satellite e per la riduzione sostanziale dei tempi di sviluppo e la produzione "in serie" obbligatoria per il *deployement* di costellazioni estese.

Il terzo asse è a carico del sistema di potenza, per il quale è necessaria un'evoluzione dell'efficienza dei pannelli solari e delle batterie.

Il quarto asse, che potrebbe aprire a queste soluzioni un mercato molto vasto, è relativo alla qualità dell'immagine e alle modalità di acquisizione:

- l'utilizzo di ADC ed *Field Programmabile Gate Array* (FPGA) di futura generazione con capacità e velocità adeguate potrà consentire un adeguamento della risoluzione ai sistemi ad altissima risoluzione;
- l'utilizzo della tecnologia fotonica potrà consentire lo sviluppo di SAR Multibanda;
- la qualifica di TRM ad alta potenza (>200W) potrà consentire lo *steering* in elevazione e l'implementazione della modalità SCANSAR.

Ultimo aspetto non secondario è la verifica dell'utilizzo di componentistica *Hi-Rel* (*COTS*) opportunamente testata e validata.

Moving Target

Il riconoscimento e l'analisi dei *target* in movimento è un passo fondamentale nelle analisi di *Image Intelligence* (IMINT). La possibilità di implementare questa tecnica risiede nella realiz-

zazione di sistemi a multipla acquisizione (costellazioni o missioni tandem) accompagnate da tecniche di *post-processing* dedicate. Le tecnologie applicabili vanno dalla *Quadratic Phase Compensation* (essenzialmente un ri-processamento SAR "dedicato" agli oggetti in movimento) fino all'utilizzo di tecniche *Inverse-SAR* (ISAR) applicate a dati acquisiti con un sistema SAR.

Data Fusion

La disponibilità di missioni satellitari SAR in diverse bande (X, C ed L) nonché di sensori *imaging* aerei in banda P apre il campo all'analisi combinata multi-banda che permette lo sfruttamento delle diverse caratteristiche di interazione tra la radiazione ed i *target* (penetrazione chiome di alberi, differenti tipi di *scattering* ...); inoltre per le applicazioni di IMINT è di grande importanza l'utilizzo di dati Ottici *Very High Resolution, VHR,* come riferimento base per il riconoscimento dei *target*, da associare all'analisi dinamica (attività) realizzata con i dati SAR.

Procedure Automatiche di Riconoscimento dei Target, ATR

La complessità dell'interazione tra segnale radar e bersagli umani complessi richiede lo sviluppo di metodologie di modellizzazione e simulazione necessarie per l'implementazione di procedure Automatiche di Riconoscimento dei Target (ATR) nelle immagini radar.

Active Transponder

Uno dei campi più proficui delle applicazioni SAR è quello della misura delle deformazioni del terreno e delle infrastrutture attraverso la tecnica dell'interferometria. Lo sviluppo e la sperimentazione di *transponder* compatti, (*Compact Active Transponder*, CAT), a basso costo costituisce un passo verso una maggior affidabilità ed accuratezza delle misure nei casi di monitoraggio della stabilità degli edifici e delle infrastrutture. Vi sono inoltre diverse opportunità di sviluppo nel campo della Difesa, attraverso ulteriori sviluppi sulla codifica del segnale.

MOTIVAZIONE PER LO SVILUPPO

Negli ultimi anni, anche a causa della congiunturale carenza di fondi istituzionali da destinare alla ricerca, è diventata sempre più pressante la necessità di affiancare allo sviluppo tecnologico - in cui il settore spaziale è sempre stato uno dei traini fondamentali - l'esigenza di concretizzare il ritorno applicativo ed il beneficio concreto di tali tecnologie per la vita quotidiana dei cittadini. In tal senso vanno letti e motivati i temi su indicati. L'impiego di sistemi ad alta risoluzione supporta attività di ***Intelligence*** e **Sorveglianza del Territorio**, garantendo in tempi brevi informazioni sensibili e di vitale importanza per la gestione di conflitti o di operazioni in zone di crisi o eventi naturali catastrofici. In particolare, un'elevata risoluzione permette l'approccio a concetti di identificazione e classificazione dei bersagli che permettono di determinare la classe di appartenenza degli oggetti e le loro dimensioni.

Lo sviluppo di SAR Commerciali a basso costo, di ridotte dimensioni in modo da poter essere stivato in piccoli lanciatori - o di supportare lanci multipli per costellazioni o formazioni - ed in grado di garantire buone prestazioni, rappresenta invece una soluzione vincente e di sicuro interesse strategico per rispondere efficacemente alla sempre più estesa richiesta da parte di stati emer-

genti, Asia, Medio-Oriente e sud America, che vogliano dotarsi di sistemi satellitari per la sorveglianza ambientale e la sicurezza dei loro territori. Ulteriori passi in questa direzione è assicurato dallo sviluppo di sistemi **mini-SAR** che permette di offrire un ***"ultra-light-radar"*** capace di gestire sia situazioni del tipo "*ready-to-launch*" (con piattaforme di dimensioni e peso molto ridotto lanciate in gruppo anche da lanciatori di stazza piccola o aviolanci), che acquisizioni multi statiche ovvero ad elevata sensibilità.

La specificità della configurazione *Geosyncronous Earth Orbit* (*GEO*) consente risoluzioni non troppo inferiori a quelle ottenibili in orbita *Low Earth Orbit* (*LEO*) con il vantaggio di assicurare sia immagini quasi continue sia rilevamento di piccole variazioni della scena osservata (*Change Detection*) estremamente utili per applicazioni di monitoraggio ambientale. Essa quindi copre il *gap*, difficilmente colmabile con costellazioni in orbita bassa, per le applicazioni in cui il tempo di rivisita sia dell'ordine dell'ora.

Le applicazioni di sensori radar in banda Ka spaziano dalla meteorologia alla *Space Surveillance* (detezione di *Debris*) oltre ad applicazioni scientifiche quali l'osservazione della variazione dello spessore e della conformazione dei ghiacciai nelle zone polari. Non secondaria applicazione è l'utilizzo di tale banda per sensori *radar doppler* per la valutazione di distanza e velocità con risoluzione centimetrica a supporto di moduli d'atterraggio (*manned o un-manned*) per l'esplorazione dei pianeti.

È evidente che il dispiegamento di piattaforme satellitari orientate all'utente con un *focus* essenziale sull'utilizzo operativo esteso dei dati acquisiti fa da volano allo sviluppo del "*data processing*" e del "*data exploitation*". Pertanto gli sviluppi tecnologici sui sistemi radar di Osservazione della Terra devono essere affiancati da sviluppi applicativi in quanto, come insegna l'esperienza dell'interferometria, c'è ancora ampio spazio di ricerca di nuove applicazioni basate su sistemi già esistenti o allo stato dell'arte.

I dispositivi GaN–HEMT (*Nitruro di Gallio- High Electron Mobility Transistor*), al crescere della frequenza fino alla regione delle microonde e delle onde millimetriche, presentano prestazioni in termini di densità di potenza d'uscita, capacità di operare ad alte tensioni di alimentazione ed elevate temperature di funzionamento, figura di rumore e robustezza nei confronti di forti interferenze in ingresso che non possono essere raggiunte da nessuna tecnologia concorrente. Grazie a tali caratteristiche i circuiti integrati su *Nitruro di Gallio/*Carburo di Silicio (GaN/SiC) offrono potenzialmente considerevoli vantaggi nelle applicazioni satellitari in cui sia richiesta una elevata potenza trasmessa associata a un alto grado di ri-configurabilità delle antenne di bordo.

La risposta alle esigenze di aumento della frequenza di trasmissione richiede un continuo sviluppo e qualifica di processi tecnologici con la progressiva riduzione delle dimensioni critiche dei dispositivi (lunghezza di *gate*).

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Sistemi radar a risoluzione sub-metrica sono allo stato dell'arte in Europa e USA , l'Italia si sta mantenendo certamente in ottima posizione in una competizione molto accesa soprattutto con la Germania. L'industria asiatica (Sud-Korea, Singapore fra altri) si sta recentemente affacciando alle tecnologie abilitanti per questi sistemi, forti della esperienza acquisita in ambito delle

Telecomunicazioni ed Elettronica in generale. Recenti collaborazioni in ambito di programmi internazionali e l'acquisizione di importanti commesse hanno consolidato il posizionamento nel mercato commerciale. Per quanto riguarda soluzioni non *imaging* come i radar per *Space Surveillance* lo scenario è molto aperto e consentirebbe di occupare un mercato ed una esigenza che, oggi, sono soddisfatti solo con sistemi terrestri.

Le soluzioni innovative per la sorveglianza ed il monitoraggio a larga scala trovano l'industria italiana pronta per le sfide internazionali sia nel mercato istituzionale Europeo, sia nel mercato commerciale, che in questo ambito è particolarmente aggressivo, grazie all'inserimento di *start-up* molto agili e con capacità di solido finanziamento privato.

Ad oggi, l'*heritage* guadagnato con le missioni in volo e in sviluppo fornisce alla cordata industriale italiana una maggiore consapevolezza dei rischi associati alle soluzioni *low cost.* È però necessario che l'industria italiana si ponga nei confronti della sfida commerciale con una maggiore flessibilità ed agilità che passa dalla revisione dei processi e degli *standard* applicabili. Una revisione accurata delle *lesson learnt* e dei margini tecnici è sicuramente un punto a favore per il mantenimento della *leadership* nel settore.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 11

SISTEMI PER LA GESTIONE E TRASMISSIONE DATI AD ALTISSIMA VELOCITÀ NELLE BANDE KA E X PER LE FUTURE MISSIONI DI OSSERVAZIONE DELLA TERRA

Ai moderni sensori ottici e ai radar per l'osservazione della Terra di nuova generazione è richiesta una risoluzione sempre più alta nonché una capacità di osservazione di aree sempre più estese. Da ciò scaturisce la contemporanea evoluzione dei sistemi dedicati all'acquisizione, alla memorizzazione e alla trasmissione verso Terra dei dati prodotti dai sensori stessi il cui volume aumenta conseguentemente.
I sistemi digitali di memorizzazione di bordo dovranno quindi gestire ingenti quantità di dati ed operare con ***throughput*** ingresso/uscita *estremamente elevati*. Il trasferimento dei dati acquisiti verso Terra richiede inoltre una evoluzione dei sistemi di trasmissione di bordo.

In linea con le esigenze sopra esposte è attualmente in corso, nell'ambito dei sistemi di memorizzazione di bordo, una migrazione di tecnologia che vede ridursi l'uso della tecnologia *Synchronous Dynamic Random Access Memory* (SDRAM) in favore della tecnologia *NAND (NOT-AND) FLASH*. Quest'ultima consente infatti la gestione di elevate capacità di *storage* con ingombri e consumi di potenza ridotti rispetto alla prima che porterebbe invece ad implementazioni impraticabili da questo punto di vista. In particolare la tecnologia *NAND FLASH* presenta le seguenti caratteristiche:

- grandi capacità di memoria:
  - fino a 128 Gbit/*device*;
  - lo *stacking* dei *devices* può essere evitato ai fini del raggiungimento della capacità di *storage* richiesta con importante beneficio in termini di costo.
- capacità di *data retention* quando il modulo di memoria è spento;
- I/O *throughput* elevati ottenuti tramite architetture con elevato grado di parallelismo;
- consumi di potenza estremamente bassi;
- ingombri notevolmente ridotti.

In termini di complessità funzionale e circuitale associata all'uso di tale tecnologia va tenuto presente che rispetto alle memorie SDRAM, specifiche caratteristiche delle memorie FLASH devono essere gestite opportunamente; tra le principali:

- numero dei cicli di scrittura: limitato rispetto a quello delle SDRAM senza opportune strategie di compensazione (*wear leveling*) potrebbe verificarsi che alcune locazioni di memoria siano continuamente scritte a discapito di altre che rimangono invece completamente inutilizzate causando quindi la *failure* prematura del modulo di memoria;
- gestione dei *bad blocks*: i settori di memoria danneggiati vengono identificati e gestiti sostituendoli con settori di riserva normalmente non utilizzati;

- tecniche di accesso alla memoria: i dispositivi FLASH prevedono un accesso per pagine, non permettendo un accesso casuale come per le SDRAM.

Rimanendo nell'ambito della funzione di memorizzazione dei dati e della loro gestione e tenendo conto delle alte velocità di trasferimento, le tecnologie impiegate per le interfacce di ingresso e di uscita nonché per il transito dei dati all'interno della stessa memoria di massa, rivestono un ruolo cruciale. In questo senso, negli ultimi anni, si è assistito ad una evoluzione che ha portato, per applicazioni ad alta velocità, all'impiego di interfacce seriali veloci rispetto all'utilizzo di *data bus* paralleli. Ciò ha consentito, oltre all'incremento delle velocità sostenibili, anche una notevole riduzione del numero di linee elettriche (*harness*) necessarie. Questa tecnologia, basata su "*High Speed Serial Link*" mutuata dalla reti di terra (ad es. *WizardLink*) e qualificata per lo spazio, ha consentito una importante riduzione della massa e la praticabilità delle connessioni ad alta velocità (fino a 2 Gbps) richieste nelle applicazioni per l'osservazione della terra di ultima generazione. Nel prossimo futuro una ulteriore evoluzione è necessaria in questo ambito. In particolare nuovi standard sono stati definiti per consentire altissime velocità di trasferimento, bassi consumi, più agevole gestione dei relativi protocolli e ulteriore riduzione delle linee fisiche di interconnessione. In particolare lo standard "*Space Fiber*", in studio da diversi anni, ed emesso recentemente nella sua versione finale permetterà di gestire velocità fino a 2.5 Gbps e potenzialità di crescita nel futuro fino a 5 Gbit/s, 6,25 Gbit/s *data signalling rate*. In questo contesto riveste particolare rilievo la possibilità di utilizzare tale soluzione utilizzando sia connessioni elettriche, analogamente a quanto impiegato attualmente, sia connessioni in fibra ottica le quali consentiranno, oltre al raggiungimento delle altissime velocità appena menzionate, anche una significativa riduzione delle masse, dei consumi e di problematiche di compatibilità elettromagnetica.

Per quanto riguarda i sistemi di trasmissione dati verso terra un primo incremento delle *performances* in termini di velocità di trasferimento è ottenibile mediante il riuso della banda di frequenze riservata alle comunicazioni da Satellite verso Terra nella Banda-X (8025 – 8400 MHz) attraverso sistemi in doppia polarizzazione.

La doppia polarizzazione si basa essenzialmente sulla diversificazione della polarizzazione dei segnali a radiofrequenza trasmessi. Per tale motivo è necessario assicurare un alto valore di isolamento tra le due polarizzazioni simultaneamente utilizzate *Right* e *Left Hand Circular Polarization* (RHCP e LHCP) al fine di minimizzare le interferenze indotte sul segnale trasmesso in una data polarizzazione dal segnale trasmesso sulla polarizzazione ortogonale. Inoltre l'adozione di sistemi di modulazione a alto ordine insieme a tecniche di codifica avanzate consentono l'aumento della quantità d'informazione trasferita per unità di banda.

Un ulteriore aumento delle velocità di trasmissione è ottenibile mediante l'uso della **Banda Ka** (25.5 GHz - 27 GHz) dove è possibile utilizzare una quantità di banda *4 volte superiore* alla Banda X.

La **X-Band** (8.025GHz – 8.4GHz) offre una banda abbastanza limitata al fine di poter sostenere velocità di trasmissione più alte di 1Gbps per polarizzazione ed inoltre presenta ormai un alto livello di congestionamento.

L'uso della banda Ka introduce però importanti problemi di propagazione legati alla notevole atte-

nuazione del segnale nell'attraversamento della atmosfera. Tipicamente il valore *target* di disponibilità del collegamento richiede l'impiego di una antenna direttiva a fascio puntabile (*steerable*) con alti valori di guadagno per garantirne la raggiungibilità. Tali antenne devono poter operare in entrambe le polarizzazioni ed essere compatibili con gli schemi di modulazione ad alto ordine.
Fissata la *link availability*, l'attenuazione atmosferica si riduce notevolmente al crescere dell'angolo di elevazione dell'antenna di Terra. Di conseguenza risulta chiaro come l'adozione di tecniche di codifica avanzate, ***Variable Code Modulation* (VCM)**, basate su una predizione statistica dell'attenuazione atmosferica e delle relative variazioni durante il collegamento, ne contrasti fortemente l'effetto, determinando al tempo stesso un miglioramento significativo del *data throughput* (fino all' 80%).
Dai risultati di esperimenti condotti in ambito di propagazione atmosferica è noto inoltre che solo poche orbite sono affette da fuori servizio dovuto alle precipitazioni, mentre per la maggior parte del tempo si possono considerare condizioni di *clear sky*. In tale contesto possono risultare estremamente vantaggiose le tecniche ***Adaptive Coding Modulation* (ACM)** basate, appunto, sulla conoscenza effettiva dell'attenuazione atmosferica durante il collegamento con la stazione di terra; tali tecniche unite a schemi di modulazione ad alto ordine riescono a incrementare ulteriormente le *performances* in termini di velocità di trasmissione. Recenti studi hanno evidenziato la possibilità di raggiungere *performances* target fino a 8Gbps per sistemi Ka in doppia polarizzazione. La massimizzazione effettiva del *data throughput* medio in *downlink* trova, inoltre, nel concetto di ri-trasmissione dei dati non correttamente ricevuti, un elemento chiave nel mantenimento di una adeguata figura di disponibilità. Infatti la porzione di dati che in un certo intervallo del contatto con una stazione di terra non è stato possibile acquisire a causa di condizioni atmosferiche particolarmente sfavorevoli può essere acquisita successivamente nello stesso passaggio, in passaggi successivi sulla stessa stazione o in una dislocata in un differente sito. Questo in virtù della de-correlazione dell'occorrenza dei fenomeni atmosferici tra differenti siti o per differenti tempi di osservazione. In questo contesto si inserisce la necessità di elementi tecnici e tecnologici atti alla gestione coerente della ritrasmissione dei dati non correttamente ricevuti. Il protocollo CFDP (*CCSDS file delivery protocol*) definisce tali meccanismi di ri-trasmissione e consente la gestione coerente dell'acquisizione di un *set* di dati (file, immagine, ecc ...) in intervalli temporali successivi. Tale componente oltre che nella infrastruttura di terra deve essere implementata nella unità di *storage* di bordo dove risiedono i dati e rappresenta un ulteriore elemento di sviluppo tecnologico dei moduli di memoria ad alta velocità e capacità basati su tecnologia *NAND FLASH*.
Sul fronte della trasmissione a Radio Frequenza è necessario considerare l'utilizzo di dispositivi ***Gallium Nitride* (GaN)** viste le caratteristiche di compattezza ed alta efficienza rispetto ad altre tecnologie per i dispositivi di amplificazione di potenza allo stato solido *Gallium Arsenide* (GaS).

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Tenendo conto delle risoluzioni sempre più alte richieste ai sensori ottici e radar, gli attuali sistemi di acquisizione e trasmissione dati richiedono nel prossimo futuro una importante evoluzione in termini di prestazioni raggiungibili al fine di poter gestire i relativi profili di missione ed i conseguenti flussi di dati che ne derivano.

Lo sviluppo delle tecnologie relative alla gestione dei dati di osservazione, necessarie ed abilitanti per l'evoluzione dei sistemi per l'osservazione della Terra, è di elevato interesse strategico. In particolare:

- sistemi di memorizzazione e gestione dati avanzati:
  - moduli di memoria basati su tecnologia *FLASH* ad altissimo *throughput;*
  - acquisizioni multicanale;
  - implementazione nella memoria di massa del protocollo CFDP;
  - utilizzo di interfacce dati veloci avanzate (ad es. *Space Fiber*).
- sistemi di trasmissione avanzati:
  - modulatori ad altissimo *data rate* operanti in X e Ka Band con tecniche di modulazione ad alto ordine e codifica variabile e/o adattativa;
  - antenne a fascio puntabile (elettronicamente o meccanicamente) in banda X e Ka in grado di essere utilizzate in doppia polarizzazione e compatibili con segnali ad alto ordine di modulazione;
  - amplificatori allo stato solido ad alta efficienza.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

In Italia sono in corso diverse iniziative per lo sviluppo degli elementi tecnologici necessari ai nuovi sistemi per la gestione e trasmissione dati a terra. In particolare:

- sistemi di memorizzazione avanzati:
  - sviluppo di memorie di massa ad elevate velocità e capacità basate su memorie *flash* attualmente in corso nell'ambito di programmi nazionali ed europei; rappresentano il punto di partenza per le evoluzioni sopra descritte.
- sistemi di trasmissione avanzati:
  - modulatori: primi sviluppi relativi all'utilizzo degli schemi di modulazione e tecniche di codifiche avanzate in banda X attualmente in corso;
  - antenne:
    - sviluppo di antenne in X-band a larga copertura con alto isolamento di polarizzazione nell'ambito di programmi nazionali;
    - sviluppo di elementi prototipali di antenne a *steering* elettronico in banda Ka.

Anche in Europa sono in corso numerose iniziative relative allo sviluppo di tecnologie: per le memorie di massa ad alte *performance*; su modulatori e amplificatori in banda X e Ka nonché sviluppi di antenne puntabili in banda X e Ka compatibili con i segnali ad alto ordine di modulazione e che supportano l'uso simultaneo delle due polarizzazioni. In Italia ci sono aziende che stanno sviluppando questa tecnologia. A Maggio 2019, inoltre, è stato emesso lo Standard spaziale europeo *SpaceFiber* (https://ecss.nl/standard/ecss-e-st-50-11c-spacefibre-very-high-speed-serial-link/).

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 12

TECNOLOGIE AVANZATE BASATE SU INTELLIGENZA ARTIFICIALE PER IL TRATTAMENTO DI IMMAGINI RADAR

Nel panorama delle tecnologie spaziali diverse sono le tecniche e le applicazioni finali, uso civile e istituzionale, che rendono i satelliti uno strumento indispensabile per la collettività e più in generale dell'economia globale. In particolare, i sistemi di osservazione della Terra basati su tecnologia radar ad apertura sintetica (SAR, *Synthetic Aperture Radar*) installati a bordo di satelliti in orbita bassa (LEO, *Low Earth Orbit*) sono in grado di produrre immagini ad elevate prestazioni utilizzate in vari campi applicativi. Negli ultimi anni tali sistemi hanno visto una crescita importante delle possibili nuove applicazioni e un aumento della sensibilità da parte degli utenti dei vantaggi che essi sono in grado di offrire.

In questo contesto, le tecniche di elaborazione dati basate su **algoritmi di Intelligenza Artificiale** (nel seguito AI, *Artificial Intelligence*, o reti neurali) e le alte prestazioni di calcolo applicate alle immagini radar hanno rivoluzionato la capacità di osservazione della superficie terrestre da satellite, non più esclusivamente strumento istituzionale o di ricerca, creando nuove applicazioni in grado di rispondere alle esigenze degli utenti. Per comprendere l'ampiezza e le potenzialità del valore ottenibile con questo strumento occorre fare riferimento alle caratteristiche di una immagine radar e l'importanza delle informazioni che da essa possono essere ottenute.

Come noto, il radar a bordo di un satellite di osservazione illumina la superficie della Terra con impulsi elettromagnetici che vengono riflessi dalla superficie osservata, restituendo il dato che rappresenta la mappa della rifrattività della scena esaminata. Questo dato grezzo contiene informazioni sulle proprietà geometriche e dielettriche della superficie o del volume dell'oggetto di studio che dipendono, principalmente, dalla scabrosità della superficie, dal tipo di materiale e dal contenuto di umidità.

Gli algoritmi di AI, applicati a questo tipo di dato, giocano un ruolo chiave nell'analisi di carattere geospaziale per riconoscere e studiare anomalie e schemi di trasformazione di tutte le infrastrutture terrestri, sia naturali e sia dovute all'attività umana, come ad esempio gli insediamenti urbani, le infrastrutture di trasporto, gli impianti industriali, la aree interessate da trasporto marittimo e le aree destinate all'agricoltura.

Per raggiungere tali obiettivi, occorre che il segmento di terra delle costellazioni di satelliti radar per l'osservazione della terra evolva al fine di comprendere gli elementi necessari per estrarre l'informazione di interesse dai dati radar. In particolare, è richiesto:

- lo sviluppo di nuove tecniche di estrazione di informazione dai dati (*knowledge retrieval*) e il miglioramento di quelle esistenti, basate su algoritmi di AI;
- la capacità di accedere alla mole di dati disponibili (in crescita) tramite le nuove tecnologie introdotte nel contesto dei *big data*, come il *cloud computing, machine learning* (ML) e *deep learning* (DL);

- la capacità di elaborazione anche di dati eterogenei generati da altre sorgenti, come le immagini satellitari ottiche, i dati *Artificial Intelligence Surveillance* (AIS) per la sorveglianza marittima e gli *open data*.

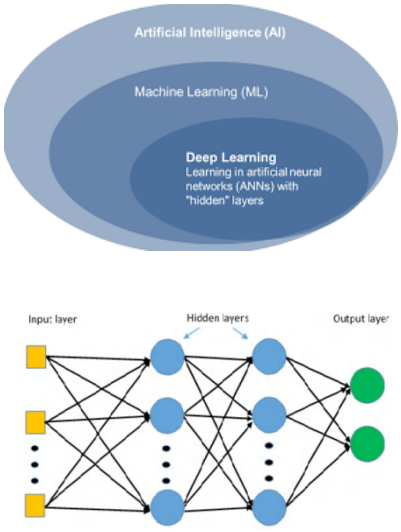


FIG. 12.1 RELAZIONE TRA LE TIPOLOGIE DI ALGORITMI AI ED ESEMPIO DI MLP (CREDIT THALES ALENIA SPACE)

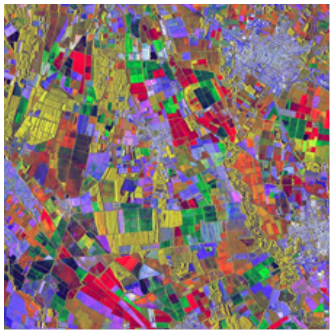


FIG. 12.2 CLASSIFICAZIONE DI UNA IMMAGINE RADAR (CAMPO AGRICOLO) TRAMITE AI (CREDIT THALES ALENIA SPACE)

Per raggiungere tali obiettivi, è necessario lo studio e lo sviluppo di metodologie ed algoritmi basati su AI per l'elaborazione e classificazione delle immagini radar. Inoltre è richiesto lo sviluppo di metodi di classificazione (*target detection, target recognition*, ecc.) per la generazione di cataloghi di prodotti SAR corredati da metadati (ad es. *labelling*), tenendo conto anche delle capacità offerte dai nuovi sensori SAR UHR *(Ultra High Resolution)* e VHR *(Very High Resolution)*
Gli algoritmi che impiegano tecnologie di AI applicabili alle immagini radar sono di varia natura, a seconda della tipologia di informazione che si vuole ottenere. I più utilizzati sono:

- Convolutional Neural Network (CNN), supervised/unsupervised;
- Multilayer Perceptron Neural Network (MLP);
- Recursive Neural Network (RNN).

La scelta dell'algoritmo e la definizione del modello di rete neurale dipende dalla tipologia e struttura del *dataset* e dalla fase di addestramento della rete neurale che occorre definire a partire dai prodotti SAR disponibili.
Gli algoritmi di AI, che impiegano le tecniche di ML e DL, consentono di velocizzare le attività di analisi e l'estrazione di informazione da enormi moli di immagini satellitari prodotte giornalmen-

te dai sistemi di Osservazione della Terra. Ad esempio, il sistema COSMO-SkyMed - costellazione Italiana di quattro satelliti radar ad uso duale (civile/militare) operativa dal 2007 - produce circa 1.800 immagini radar ogni 24 ore. Grazie all'uso di tecnologie di elaborazione dati innovative, le informazioni che si possono ottenere dalle immagini satellitari acquistano un valore estremamente più grande di quello associabile alla singola immagine SAR.
Secondo recenti e autorevoli studi in questo settore, il mercato globale dei servizi legati all'Osservazione della Terra, tramite sistemi satellitari, è destinato a crescere nei prossimi anni generando un considerevole valore; si prevede che le stime di crescita saranno pari a circa il 6% per i prossimi 10 anni. Questa crescita non è giustificata dalla vendita del solo dato satellitare (l'immagine), ma soprattutto dal valore estraibile da essa attraverso l'utilizzo di tecniche innovative, in particolare basate su AI.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Attualmente le tecniche di "*Data Analytics*" con l'uso di algoritmi di intelligenza artificiale sono impiegate per l'analisi strutturata di dati in vari settori industriali ed applicativi, incluso quello dei sistemi spaziali. Queste metodologie sono note in letteratura da alcuni decenni, ma negli ultimi anni hanno assunto notevole importanza nel campo dell'elaborazione dati grazie alla maggiore capacità di calcolo offerta dai nuovi sistemi *hardware*. Tra le principali motivazioni di un impiego così diffuso vi è la capacità di tali algoritmi di individuare relazioni nei dati, di classificare le informazioni a supporto dell'utente e anche per l'efficienza e la scalabilità rispetto alla dimensione dell'archivio dati (*dataset*). Ad esempio, alcuni casi d'uso sono:

- identificazione e riconoscimento di oggetti di interesse in immagini satellitari per il monitoraggio di infrastrutture critiche o per la sorveglianza marittima;
- analisi di anomalie nei dati di controllo del traffico aereo per la salvaguardia della sicurezza sia in volo che a terra nel settore aereonautico;
- analisi predittiva di trend dei titoli dei mercati azionari ed identificazione di frodi nel settore bancario e finanziario;
- analisi dati multi-sensore in mezzi di trasporto a guida autonoma, per l'orientamento in percorsi complessi nel settore dei trasporti;
- identificazione e riconoscimento di oggetti in immagini o video a supporto di strumenti investigativi delle forze di polizia.

Nel settore industriale dello Spazio, la necessità di far evolvere i sistemi satellitari per l'osservazione della Terra per soddisfare le esigenze degli Utenti - sia a livello nazionale che internazionale - rappresenta la principale motivazione per il mantenimento e lo sviluppo della capacità di concepire, progettare e produrre metodologie di *data processing* con l'uso di tecnologie avanzate, al fine di rendere disponibili dati satellitari radar che inferiscono direttamente nella definizione dei servizi applicativi.
L'osservazione della Terra è, a tal proposito, il settore che permette il maggior numero di applicazioni con impatti positivi in molti aspetti della vita sociale e di *business* che ci si trova ad affrontare quotidianamente: difesa, sicurezza, *risk management*, gestione delle risorse naturali ed ener-

getiche, settori assicurativi e finanza. Come detto, si tratta di una contaminazione tra industrie diverse per tipologia di attività, servizi e necessità, ma che trovano una comune risposta nell'AI applicata alle immagini satellitari soprattutto di tipo radar.

Oggi stiamo assistendo ad una *digital and sensing revolution* che fornisce una quantità senza precedenti di dati sullo stato del nostro pianeta e dei suoi cambiamenti. Siamo ad un incrocio di opportunità, dove da un lato l'AI sta diventando una delle più importanti tecnologie di trasformazione del ventunesimo secolo, mentre d'altra parte i sistemi di Osservazione della Terra forniscono un quadro del tutto unico e completo del pianeta. Gli algoritmi di AI sono parte fondamentale della soluzione per gestire tale mole di dati, consentendo una esplorazione scalabile dei problemi di grandi dimensioni, fornendo una nuova visione dei dati sia per scopi di classificazione che di capacità predittive.

È comunemente riconosciuto che le tecniche di elaborazione basate su AI hanno un grande potenziale nel settore dell'osservazione della Terra, in parte ancora inutilizzato, in particolare nelle immagini radar per lo sfruttamento del loro prezioso contenuto informativo. In questo campo l'utilizzo delle diverse tecniche di AI, come *Machine Learning*, *Deep Learning* ed *Algoritmi Genetici*, sta dando risultati molto promettenti. L'uso dell'AI nell'elaborazione di immagini radar sta trovando sempre più utilizzo ed una forte sinergia in campi applicativi emergenti, come *image recognition, classification* ed *data fusion*. Completa questo scenario la disponibilità di altri dati eterogenei generati da sensori posti, a terra o a bordo, di velivoli (aerei o *Unmanned Aerial Vehicle*, UAV) che consentono di aumentare la capacità dei sistemi di osservazione della Terra, tramite l'analisi integrata e lo sfruttamento di dati radar acquisiti da satellite.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

L'Italia vanta nel contesto europeo ed internazionale un ampio patrimonio tecnologico nel settore dello Spazio. Thales Alenia Space è parte attiva dell'evoluzione della *Space Industry* coinvolta nella trasformazione digitale e nell'uso di tecnologie avanzate che impiegano l'intelligenza artificiale per estrarre informazione dai dati generati dai sistemi di osservazione della terra. Il valore aggiunto di questo processo in atto a livello di *upstream* (cioè parte integrante dell'infrastruttura del sistema satellitare) è di incrementare la definizione di nuovi servizi (*downstream*) a cura di altre aziende Partner, anche nel contesto della *Space Alliance*.

Lo sfruttamento di immagini radar tramite tecniche avanzate come l'AI trova applicazione in vari contesti di osservazione della Terra, sia in ambito commerciale che istituzionale, come ad esempio:

- monitoraggio delle Infrastrutture (ad es. ferrovie, edifici);
- monitoraggio dell'agricoltura;
- gestione di rischi (ad es. terremoti, smottamenti, inondazioni);
- sorveglianza marittima per l'individuazione delle navi e l'identificazione delle anomalie;
- sorveglianza dei confini;
- individuazione dei cambi;
- identificatione dei veicoli;
- sviluppo urbano;

- petrolio e gas;
- cartografia;
- modello di Elevazione Digitale (DEM).

In questo settore, piccole e grandi aziende stanno evolvendo per tener il passo della *Digital Transformation*, che sta portando cambiamenti sia nel modo di eseguire i processi industriali che nella valorizzazione dei prodotti rivolti agli utenti. Con questa nuova visione le più grandi aziende come Google, Microsoft, Amazon ed IBM stanno investendo molto sull'AI offrendo soluzioni definite ***"Machine Learning as a Service"*** (MLaaS), che portano a casa dell'utente soluzioni, allo stato dell'arte, per problematiche come: *face recognition, natural language processing, predictive analytics* e *deep learning.*

Da un'analisi globale emerge che c'è un'alta concentrazione di ricerca e sviluppo nell'AI in Europa ed in Asia, con la Cina, il Giappone e la Corea del Sud che guidano le nazioni dell'Est nella ricerca e pubblicazione di *papers*, nel coinvolgimento di Università e richieste di brevetti. L'Europa ha pubblicato il più alto numero di *papers* nell'AI con il 28% di tutte le pubblicazioni sull'argomento, la Cina il 25% mentre il Nord America il 17%. Questi dati indicano un forte interesse e la crescita della ricerca in questo specifico settore della *Digital Trasformation*.

A conferma del crescente interesse in questo settore, nella figura seguente (Figura 12.3) è riportato l'aumento esponenziale del numero di *papers* negli ultimi anni, diviso per i diversi ambiti di applicazione dell'AI.

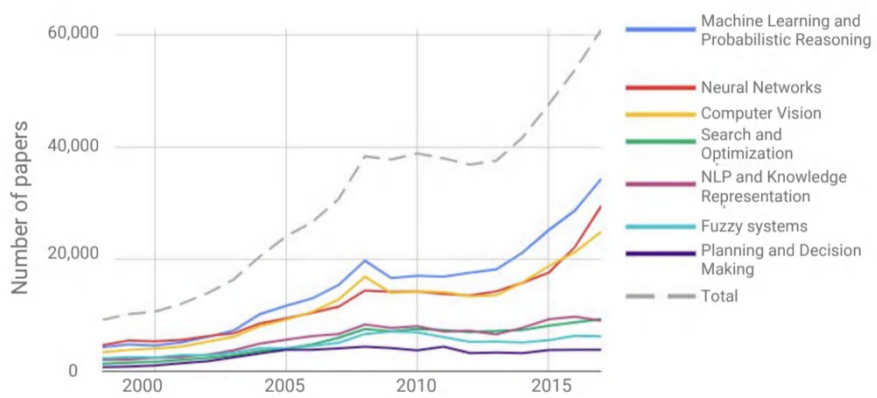


FIG. 12.3 NUMERO DI ARTICOLI SULL'AI NEGLI ULTIMI ANNI (CREDIT KRISTEN CARLSON)

L'Europa sta investendo e sviluppando in AI, anche nel settore spaziale, che è senza dubbio una delle colonne portanti in questa rivoluzione tecnologica.

Come noto, gli USA ospitano attori importanti nel campo dell'AI, come Google, Apple, Facebook, Amazon (GAFA), ma anche nuovi attori come Nvidia, che sta diventando *leader* mondiale nello sviluppo di chip *Graphic Processing Units* su misura per AI.

Infine, la Cina ha grandi ambizioni nel campo AI, ospita i grandi giganti WEB Baidu, Alibaba, Tencent e Xiaomi (BATX) che stanno portando all'avanguardia sviluppi in AI in settori diversificati.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 13

TECNOLOGIE DI CYBERSECURITY PER LA PROTEZIONE DEI SISTEMI SPAZIALI

Nella progettazione e sviluppo di sistemi satellitari destinati alle varie tipologie di missione, come l'Osservazione della Terra, la Navigazione e le Telecomunicazioni, il tema *Cybersecurity* è divenuto un elemento tecnologico imprescindibile per garantire l'affidabilità e la resilienza dei sistemi satellitari stessi. Questo tipo di tecnologia richiede una crescente conoscenza tecnica specifica dello stato dell'arte e delle metodologie in materia di protezione da attacchi *Cyber* (analisi automatica delle minacce, algoritmi matematici di crittografia, ecc...) e il suo utilizzo è sempre più diffuso in tutti i sistemi complessi che richiedono la gestione e lo scambio di informazioni. L'obiettivo finale è quello di assicurare continuità ai servizi richiesti dall'utente e di preservare l'integrità delle informazioni e dei dati generati dai sistemi satellitari (come, ad esempio, le immagini radar in un sistema di osservazione della Terra) e dei dati riguardanti il controllo e monitoraggio dei satelliti in orbita.

Per raggiungere tali obiettivi è quindi indispensabile acquisire e sviluppare tecniche avanzate ed algoritmi di *Cybersecurity* per la protezione dei sistemi spaziali, in grado di garantire un livello adeguato di sicurezza rispetto alle possibili minacce esterne. La sicurezza dei dati è un elemento chiave nei sistemi spaziali e riguarda sia il Segmento Spaziale sia il Segmento di Terra.

Tipicamente, come mostrato schematicamente in Figura 13.1, l'architettura del segmento di Terra di un sistema satellitare può comprendere varie funzionalità di C*ybersecurity* per la protezione dei dati da accessi indesiderati ed attacchi cibernetici; alcune tra queste sono, ad esempio, il servizio di:

- *Intrusion Prevention System* (IPS), in grado di rilevare e bloccare le minacce identificate, tramite correlazione di più fonti di informazione eterogenee;
- *Blockchain* per la caratterizzazione delle operazioni e degli stati nominali rispetto alla sicurezza, cioè per definire quali transizioni di stato e/o di messaggi sono legittimi;
- *Cyber Range*, in grado di gestire le attività degli utenti nell'utilizzo della rete dati nell'ambiente operativo; permette di ottenere una analisi di dettaglio sui tempi di reazione, di risposta alle minacce, di ripristino delle configurazioni operative prestabilite nei vari scenari critici.

Il dominio informativo di un sistema satellitare è costituito normalmente da una architettura estesa ed eterogenea di vari elementi. Le frequenti attività di *information sharing* tra tali entità distinte, distribuite ed interconnesse a livello geografico, non possono esulare da una costante "C*ybersecurity Awareness*" da parte degli utenti che, nel dominio stesso, accedono a vario titolo alle informazioni in esso presenti.

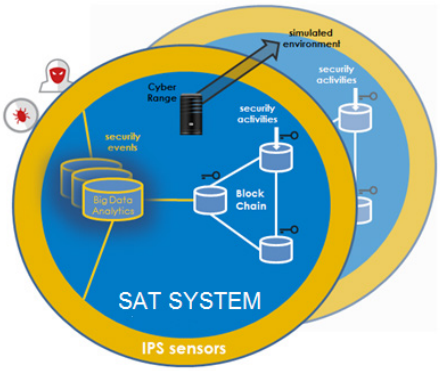


FIG. 13.1 SCHEMA DI PRINCIPIO DEI SERVIZI DI CYBERSECURITY (CREDIT THALES ALENIA SPACE)

Tale obiettivo strategico può essere raggiunto con un'adeguata progettazione delle infrastrutture di rete, adottando le relative misure fisiche e/o adeguate politiche di sicurezza, ma soprattutto con l'implementazione di sistemi *ad-hoc* di controllo, simulazione e addestramento che, in ambito C*ybersecurity*, diano garanzie in merito alla stabilità e alle performance dei sistemi di sicurezza, nonché ad una tempestiva applicazione di predefinite procedure di *recovery* al verificarsi di anomalie.

In tal senso, assume un ruolo di primaria importanza il ***Cyber-range*** nel contrastare consapevolmente le più recenti minacce cibernetiche; questo strumento di *Cybersecurity* costituisce un ambiente virtuale, altamente configurabile, in grado potenzialmente di simulare una infinità di scenari di attacco cibernetico su differenti tipologie di rete e con differenti profili di traffico. Di fatto un *cyber-range* è un sistema interno al dominio da proteggere, disconnesso da qualunque rete esterna (e quindi da internet), perciò utilizzabile, con le opportune verifiche, anche in ambienti classificati durante attività di test o di addestramento, senza che vi sia pericolo di danneggiamento o distruzione dell'informazioni gestite nel dominio stesso.

Questo strumento può essere affiancato, nonché integrato, da un sistema centralizzato, un IPS in grado, oltre che di rilevare e bloccare le minacce identificate, anche di correlare fonti di informazioni multiple, provenienti da vari scenari operativi/siti del sistema satellitare, identificando ed incrociando differenti riscontri di anomalie ed attività sospette tramite tecniche avanzate di *Big Data Analytics*, al fine di rendere più efficace il sistema di anti-intrusione.

Ulteriore soluzione tecnologia di *Cybersecurity* impiegabile nel segmento di Terra del sistema satellitare è il *Blockchain*, per l'imputabilità degli eventi rilevanti ai fini della sicurezza. Originariamente utilizzata a protezione delle transazioni *Bitcoins*, la tecnologia *Blockchain* declinata al sistema satellitare fornisce garanzia in modo automatizzato, in merito alla imputabilità degli eventi pertinenti alle configurazioni di sicurezza quali, ad esempio, la gestione degli utenti e dei relativi profili (diritti di accesso), le operazioni di *key management*, le attività di generazione e scambio documenti. Tale soluzione può diventare tra l'altro parte integrante nella gestione e elaborazione di grossi quantitativi di dati (*big data*) e quindi nella progettazione di un IPS più affidabile.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

L'evoluzione e l'impiego dei sistemi satellitari nei vari settori industriali, applicativi e di ricerca, sia a livello nazionale che internazionale, rappresenta la motivazione principale per il mantenimento e lo sviluppo della capacità di concepire, progettare e produrre sistemi di *Cybersecurity* e tecnologie avanzate al fine di garantire l'operatività della missione spaziale richiesta dall'utente, assicurando l'integrità ed inaccessibilità dei dati ad enti esterni.

Rispetto al passato, i sistemi satellitari sono sempre più connessi alle infrastrutture di rete e di telecomunicazione terrestre esistenti, sia per il trasporto delle informazioni tra i siti presenti nell'infrastruttura del sistema stesso (centri di controllo satellite, centri di controllo missione, stazioni di ricezione/trasmissione dati su *link* satellitare, ecc...) e sia verso gli utenti, per consentirne l'accesso e la fruizione dei servizi. Ciò spesso comporta l'interfaccia con altri sistemi eterogenei esterni, potenzialmente regolati da diverse politiche di protezione delle informazioni. Quindi è evidente la necessità di proteggere tutti gli elementi del sistema satellitare, soprattutto quando questo costituisce un *asset* strategico nazionale, oppure è parte integrante di una infrastruttura critica utilizzata per scopi di Difesa ed Intelligence.

Inoltre, occorre considerare che la complessità della tematica di *Cybersecurity* può richiedere la collaborazione con Università ed Enti di ricerca presenti in Italia e specializzati in questo settore tecnologico. Questo consente di affrontare in modo congiunto la ricerca, sperimentazione e validazione delle soluzioni tecniche efficaci e all'avanguardia, costantemente allineate con le potenziali minacce.

I sistemi spaziali sono un potenziale *target* appetibile per attacchi cibernetici, in quanto la compromissione di un sistema spaziale può determinare un disservizio su altri sistemi ad esso connessi. Ad esempio, i sistemi satellitari di Navigazione (come Galileo o GPS), di Osservazione della Terra o di Telecomunicazione sono ampiamente utilizzati ed integrati ad altre infrastrutture a terra per l'erogazione dei servizi agli utenti.

Esiste un'ampia casistica di attacchi cibernetici che sono stati rivolti verso i sistemi spaziali negli ultimi vent'anni. Spesso si tratta di azioni di disturbo (*Jamming*), seppure limitate nel tempo, ai sistemi di comunicazione tramite segnali interferenti. Gli attacchi tipici riguardano:

- i sistemi di comunicazione terra-bordo dedicati al controllo satellite Telemetria e Telecomando (TM/TC), con l'obiettivo di prendere il controllo del segmento spaziale;
- il segmento spaziale, con l'obiettivo di inibire funzionalità critiche, quale il supporto alla navigazione, alle telecomunicazioni o all'osservazione della terra, oppure per acquisire in modo fraudolento i dati che questi sistemi generano;
- il segmento di terra, con l'obiettivo di inibire o compromettere le funzioni di controllo del segmento spaziale o le funzioni di elaborazione dei dati ricevuti a terra.

In generale, tali attacchi mirano a compromettere la confidenzialità, l'integrità e la disponibilità di dati, sistemi e relativi servizi. Normalmente, vengono indicati come "vettori" di attacco per ogni specifico sistema spaziale, che quindi richiedono una analisi mirata ad identificare le vulnerabilità del determinato sistema *target*.

Alcuni vettori di attacco possono essere diretti alla fase di realizzazione, altri mirano alla fase

operativa o alla gestione e manutenzione del sistema spaziale. Altri ancora possono interessare le apparecchiature di prova utilizzate per verificare e collaudare componenti, sottosistemi e sistemi spaziali, nonché la catena di fornitura di hardware e software per il sistema stesso.
Per contrastare in modo strutturato e sistemico le minacce, occorre prima eseguire l'analisi degli scenari di attacco ai fini della completa caratterizzazione dei rischi, poi degli *item* critici rispetto agli attacchi, fino ad identificare i requisiti di sicurezza a partire dalla progettazione (*Security by Design*). Tale attività è, di fatto, parte integrante della progettazione dei sistemi spaziali.
Una volta definiti i requisiti di sicurezza ed allocati ai segmenti del sistema, occorre utilizzare le tecnologie adeguate in grado di proteggere il sistema spaziale, garantendo il rispetto dei requisiti stessi. I moderni schemi di **crittografia** rappresentano uno degli espedienti per proteggere i dati degli *asset* spaziali. La crittografia dei dati e dei canali di comunicazione rappresenta una delle soluzioni per mitigare i rischi di attacco. In alcuni casi l'adozione di strumenti di "*intelligence* delle minacce" può essere di ausilio, in termini di capacità di controllo ed analisi dei flussi di dati nel sistema spaziale, al fine di classificare la tipologia degli attacchi ed adottare le contromisure adeguate.
Con gli strumenti di crittografia le informazioni trasmesse attraverso i canali di comunicazione satellitare sono accessibili solo a chi detiene la chiave crittografica. Ciò costituisce la prima linea di difesa contro gli *hacker* sulla rete di comunicazione e sui sistemi spaziali. Occorre però considerare che gli attacchi sono rivolti anche a decifrare i sistemi di protezione, e pertanto è necessario aggiornare dinamicamente queste contromisure. Per individuare le minacce spesso si impiegano sistemi di rilevamento delle intrusioni o *Intrusion Detection System* (IDS), che consentono di monitorare gli eventi di attacco ai canali di comunicazione o ai calcolatori (a bordo o a terra), e di intercettare eventuali segnali di intrusione che tentano di violare i meccanismi di sicurezza.

L'IDS analizza gli eventi sulla base dei dati acquisiti da sensori posti sul campo. Per supportare l'IDS esistono tre tipologie di "*Cyber Analytics*", caratterizzate come segue:

a) basate sull'abuso:
- progettato per rilevare attacchi noti usando le loro firme (tracce);
- rileva effettivamente i tipi noti di attacco senza generare falsi allarmi;
- richiede frequentemente l'aggiornamento manuale dei dati;
- non in grado di rilevare nuovi attacchi di zero-day.

b) basate sull'anomalia:
- identifica le anomalie come scostamento dal comportamento normale;
- capace di rilevare attacchi di zero-day;
- i profili dei comportamenti nominali sono specifici di ciascun sistema.

c) ibride:
- combinazione delle tipologie basate su abuso e su anomalia;
- aumenta il tasso di rilevamento e diminuisce l'occorrenza di falsi allarmi.

Tra le tecnologie innovative a supporto dell'IDS vi sono gli algoritmi basati sull'Intelligenza Artificiale (AI) ed il *Machine Learning* (ML) o apprendimento automatico. Queste tecnologie permettono di implementare metodologie che, a partire da insiemi di dati, siano in grado di estrarre

informazione, apprendere e fornire indicazioni su azioni da intraprendere a seconda del contesto delle minacce. Queste tecniche di *Data Analytics* sono in grado di "apprendere" dai dati (per questo si parla di *Data-Driven Learning*) senza necessità di una programmazione a priori che implementi un determinato comportamento prefissato, consentendo quindi di fronteggiare minacce non note a priori e gestire rischi in modo dinamico.
In questo panorama di tecnologie, il *Data Mining* (DM) e il *Deep Learning* (DL) hanno acquisito negli ultimi hanno un ruolo di primo livello per l'estrazione di informazione dai dati. Il DM si focalizza sulla ricerca di proprietà non note a priori nei dati e estrae *pattern* di interesse, mentre il DL (apprendimento approfondito) è una tecnica di apprendimento automatico. Altri approcci includono la programmazione logica induttiva, il *Clustering* e le *Bayesian networks* (BN). In particolare, le BN consentono di costruire modelli costituiti da un insieme di variabili e le loro dipendenze condizionali, per rappresentare le relazioni probabilistiche tra attacchi e "sintomi": dati i sintomi in *input* è possibile stimare la probabilità di un determinato attacco.
Esistono quindi diverse metodologie di *Data Analytics* utilizzabili nel contesto della sicurezza informatica, ed è importante determinare quelle maggiormente appropriate per la protezione dei sistemi spaziali, in funzione dell'analisi dei rischi e del contesto delle minacce. Alcune soluzioni analizzano i dati relativi alle comunicazioni (in particolare le informazioni di controllo dei protocolli di comunicazione) per individuare eventuali irregolarità, mentre altri si concentrano sul comportamento delle risorse del sistema per rilevare eventuali schemi che si discostano dalla norma. Tali tecniche possono ridurre notevolmente il tempo necessario per il rilevamento delle minacce (*Anomaly Detection*) e la scelta delle contromisure, per garantire una risposta in tempo reale. Esse aiutano anche a ridurre i falsi allarmi e a classificare, in ordine di priorità, gli avvisi di sicurezza tradizionali, aumentando l'efficacia degli investimenti.
D'altra parte, occorre anche considerare che le minacce spesso adottano strategie sofisticate in quanto, a loro volta, possono fare uso delle tecnologie basate su AI e ML, per acquisire informazioni sui loro bersagli e per lanciare attacchi sempre più sofisticati e difficili da intercettare.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

L'approccio alla sicurezza dei sistemi spaziali può beneficiare dell'uso di *Standard* esistenti anche se questi non sono prescrittivi. Si tratta di un insieme di *Standard* industriali contenenti *best practices* per supportare la gestione dei rischi dovuti ad attacchi *cyber*. Tra questi vi è il NIST (*National Institute for Standards and Technology*) che è stato nominato responsabile per lo sviluppo di tali linee guida. Quelle pubblicate nel 2014, costituiscono il "*Framework* per migliorare la *Cybersecurity* delle Infrastrutture Critiche", che consiste di tre patti principali: *Framework Core, Framework Profile, Framework Implementation Tiers*.
Un altro *framework* simile è il programma per la diagnostica e la mitigazione continua (CDM) del *Department of Homeland Security* per l'identificazione, definizione di priorità e attenuazione dei rischi di *Cybersecurity* delle reti e dei sistemi governativi. I *Common Criteria* (CC) per la valutazione della sicurezza delle tecnologie dell'informazione, costituiscono uno standard internazionale (ISO/IEC 15408) per la certificazione di sicurezza informatica. Si tratta di un *Framework* in cui gli utenti dei sistemi informatici possono specificare i loro requisiti di sicurezza e funzionali in

un *Security Target* (ST) e possono essere caratterizzati da un *Protection Profile* (PP). I sistemi e i prodotti possono quindi implementare gli attributi di sicurezza richiesti dal Cliente e nei laboratori di test si possono valutare i prodotti per determinare se effettivamente soddisfano le richieste. In altre parole, il *Common Criteria* garantisce che il processo di specificazione, implementazione e valutazione di un prodotto per la sicurezza dei sistemi informatici sia stato condotto in modo rigoroso, *standard* e ripetibile a un livello commisurato all'ambiente di destinazione da utilizzare.
Inoltre, lo standard ISO/IEC 27001 specifica un sistema di gestione destinato a garantire la sicurezza delle informazioni sotto il controllo di gestione e fornisce requisiti specifici. Le organizzazioni che soddisfano i requisiti possono essere certificate da un organismo di certificazione accreditato dopo aver completato con esito positivo un *audit*.
L'applicabilità di questi standard nel contesto degli *asset* spaziali dipende dalla tipologia di sistema, dai requisiti del Cliente ed Utente Finale, nonché dallo scenario operativo nel quale è inserito il sistema spaziale stesso. Per far fronte ai rischi di natura *cyber* nei sistemi spaziali, in letteratura è consigliato di ispirarsi agli standard applicabili e ai rispettivi processi, procedere con una accurata analisi dei rischi inerenti la sicurezza informatica, investire in risorse e in competenze tecniche specifiche. A questo riguardo, è inoltre importante condividere informazioni sulle minacce *cyber* tra le diverse organizzazioni interessate (Agenzie Spaziali, Operatori satellitari, Stakeholder, Istituzioni Pubbliche, Difesa, ecc...), stabilendo adeguati criteri di condivisione delle informazioni, documentare e mantenere i principi e gli standard di sicurezza informatica del sistema spaziale.
Poiché i sistemi spaziali sono strettamente integrati con altri settori industriali, ecosistemi e infrastrutture di servizi, è necessario condividere informazioni sulle potenziali minacce per i sistemi spaziali che possono impattare sulle infrastrutture critiche dipendenti da questi. I settori rilevanti che possono essere interessati nella gestione di tali criticità sono, ad esempio, quello dei servizi di emergenza, della difesa, delle infrastrutture critiche dei trasporti o della gestione delle risorse primarie (acqua, elettricità, gas).
È, quindi, evidente che occorre adottare lo stato dell'arte delle tecnologie di *Cybersecurity* per la protezione dei sistemi ed *asset* spaziali, impiegare tecniche IDS accurate e performanti, adottare metodologie avanzate di *Data Analytics* basate su algoritmi di AI (e non solo) per la ricerca delle minacce e l'attuazione di contromisure. D'altro canto, è scontato che nelle fasi di progetto e realizzazione dei sistemi spaziali è indispensabile tenere conto del tema *Cybersecurity*, come elemento imprescindibile per garantire il corretto funzionamento del sistema complessivo, e integrato in tutte le fasi del ciclo di vita del sistema stesso.
L'Italia vanta nel contesto nazionale la presenza di un patrimonio tecnologico e di *know-how* nel settore della *Cybersecurity*, a livello industriale e di ricerca, in grado di fornire soluzioni applicabili per la protezione dei dati di sistemi complessi, come le infrastrutture di un sistema spaziale. Nel contesto istituzionale nazionale, particolarmente rilevante è la recente costituzione del "Comando Interforze per le Operazioni Cibernetiche (CIOC)" per mettere in sicurezza le comunicazioni militari e difendere le reti informatiche delle Forze Armate italiane, nonché per testare la sicurezza delle reti e delle informazioni. Analoga entità è presente anche a livello istituzionale italiano per la protezione delle infrastrutture di rete critiche sul territorio nazionale.
Thales Alenia Space è parte attiva nel processo di evoluzione della *Space Industry* coinvolta nel-

la trasformazione digitale e nell'uso di tecnologie avanzate nella *Cybersecurity*, in particolare (ma non solo) per le applicazioni che riguardano le missioni per la Difesa, come il sistema duale COSMO-SkyMed (per l'Osservazione della Terra) e il sistema SICRAL (per le Telecomunicazioni in teatro operativo). A questo riguardo, le linee di prodotto in Thales Alenia Space comprendono questa tecnologia, come elemento differenziatore per l'offerta verso i clienti ed utilizzatori finali.
In questo scenario, Thales Alenia Space ha definito e realizzato soluzioni tecniche per proteggere i canali di comunicazione dati tra il segmento spaziale e il segmento di Terra. Il livello di protezione è flessibile in modo da incontrare le varie esigenze dell'utente ed è applicabile sia a dati di Telemetria e Telecomando (TM/TC) sia ai dati di missione in relazione a missioni di:

- Osservazione della Terra;
- Navigazione, incluso Aerocom;
- Telecomunicazione.

Le soluzioni tecnologiche sono implementate sia a hardware che a software in funzione delle specifiche necessità e della fattibilità tecnica, soprattutto per le unità presenti a bordo del satellite. Esse sono definite in modo da soddisfare le varie esigenze e requisiti di sicurezza dell'utente (*user security needs*) e riguardano:

- sezione di bordo, costituita da uno o più unità;
- sezione a terra, parte del segmento di terra.

Le tecnologie utilizzate sono basate su *standard* internazionali (*COMMON CRITERIA, NATO SDIP*) e consentono di adattare il livello di sicurezza alle esigenze dell'utente.
In questo senso, fondamentale è anche la collaborazione con aziende specializzate in questo settore, ivi compresi i centri di ricerca di eccellenza nell'ecosistema aerospaziale (e non solo) a livello italiano ed internazionale.
Il CIRA (Centro Italiano Ricerche Aerospaziali) con una pluridecennale esperienza nelle attività di supporto al progetto di sistemi spaziali, in particolare nelle analisi RAMS *(Reliability, Availability, Maintainability, and Safety)* con un *focus* sulla *Safety Assurance* sia per la componente hardware che per la componente software dei sistemi, ha acquisito negli ultimi anni una esperienza in ambito *aviation* per il *risk assessment* in caso di attacchi *cyber* e la modellazione degli scenari di rischio.
Altre aziende EU e USA sono attive in questo settore industriale e possiedono tecnologie parimenti avanzate.
In questo panorama industriale e tecnologico, occorre considerare che la complessità della tematica di *Cybersecurity* richiede la collaborazione di più attori sullo scenario nazionale ed internazionale per capitalizzare esperienze e coprire le varie analisi del ciclo di vita del prodotto, contribuendo quindi alla formazione di una comunità scientifica/tecnologica interdisciplinare, armonizzata e focalizzata sulla tematica *cyber*. Questo consente di affrontare in modo congiunto la ricerca, la sperimentazione e la validazione delle soluzioni tecniche efficaci e all'avanguardia, costantemente allineate con le potenziali minacce e fare anche trasferimento tecnologico verso altri domini altrettanto vulnerabili e critici.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 14

OROLOGI ATOMICI SPAZIALI "NEXT GENERATION"

L'utilizzo di riferimenti di tempo ultra-stabili, forniti da orologi atomici, è al centro di varie applicazioni in ambito Spazio che vanno dai test di Fisica Fondamentale alla Navigazione nello Spazio Profondo ai Sistemi di Navigazione Satellitare (GNSS).

Nel contesto GNSS, attualmente il settore di applicazione principale e in continua crescita, gli orologi forniscono il segnale di tempo a bordo di ogni satellite della costellazione.

È proprio questo riferimento di tempo comune, assieme alla conoscenza della posizione dei satelliti, che permette a un ricevitore a terra di ricavare le proprie 3+1 coordinate spazio-temporali mediante un'operazione di triangolazione, elaborando i segnali ricevuti da un numero minimo di 4 satelliti. Ma quanto devono essere *precisi* gli orologi spaziali per la navigazione?

In prima approssimazione, poiché le distanze in gioco nella triangolazione sono ricavate dalle misure di tempo impiegato dai segnali, propagatosi alla velocità della luce, a raggiungere il ricevitore, un errore di temporizzazione di 1ns (1 miliardesimo di secondo) comporta un errore di circa 30 cm nella determinazione della posizione del ricevitore.

Gli orologi atomici sono gli unici strumenti in grado di fornire una temporizzazione di tale precisione. Essi generano un segnale radio (tipicamente a 10MHz) la cui frequenza viene continuamente confrontata con quella di una transizione elettronica di un campione atomico al suo interno.

L'industrializzazione in ambito Spazio di questi raffinati strumenti, con l'obiettivo di prestazioni sempre più elevate in termini di stabilità e affidabilità a fronte di masse, volumi e costi ridotti, è una sfida tecnologica di massimo livello.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

In Europa è stato sviluppato il primo *Maser* Passivo all'idrogeno S-PHM (*Space Passive Hydrogen Maser*) da utilizzare come orologio atomico per impiego spaziale (Figura 14.1). Questo orologio atomico vola, come orologio primario, con pieno successo sui satelliti del sistema di navigazione europeo Galileo. È da sottolineare il ruolo primario dell'industria italiana (Leonardo Spa) nello sviluppo di questo prodotto, che la pone in una posizione di assoluta *leadership* a livello mondiale.

In totale Leonardo, in collaborazione con l'azienda fornitrice svizzera Orolia SpectraTime, ha fornito al sistema Galileo 53 modelli di volo (1 GIOVE, 8 IOV, 28 W01 And 16 W02) e tutti i modelli sono stati lanciati con successo.

Per consolidare questo vantaggio competitivo è stato ovviamente necessario continuare lo sviluppo del prodotto "orologi atomici di Leonardo" esplorando le soluzioni tecnologiche e ingegneristiche mirate alla riduzione del peso e dei consumi di potenza elettrica, mantenendo le prestazioni in termini affidabilità, stabilità e la compatibilità con l'ambiente spaziale, in vista della prossima generazione di sistemi di navigazione.



FIG. 14.1 MODELLI DI VOLO DEL PHM DELLA COSTELLAZIONE GALILEO (CREDIT LEONARDO)

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Il *Maser* Passivo all'idrogeno S-PHM rappresenta lo stato dell'arte per gli orologi atomici per sistemi satellitari di navigazione, consentendo di raggiungere stabilità migliori di circa un ordine di grandezza rispetto ai riferimenti al rubidio (RAFS) utilizzati nei sistemi di navigazione attualmente operativi (GPS, GLONASS). Con tali caratteristiche, il S-PHM permette di determinare la posizione a terra del ricevitore con una precisione di 30cm, proporzionale alla stabilità dell'orologio, senza necessitare di una elevata frequenza di ri-sincronizzazione del sistema.

Di contro gli orologi al rubidio (RAFS) sono più leggeri e compatti rispetto al S-PHM e per questa ragione sono state avviate diverse attività di ricerca finalizzate a sviluppare orologi atomici che garantiscano prestazioni analoghe a quelle del S-PHM in termini di precisione e stabilità, con un risparmio significativo su massa, dimensioni e consumo di potenza elettrica.

In questa direzione Leonardo ha sviluppato il mini-PHM che, malgrado una riduzione di circa 30% dei consumi e del peso, mantiene la stessa prestazione del PHM.

Nell'ambito del programma ESA GSTP 6.2, finanziato dall'ASI, Leonardo, in collaborazione con l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM), sta conducendo l'industrializzazione dell'orologio Rb-POP (*Rubidium-Pulsed Optically Pumped*).

Nel Rb-POP il segnale di riferimento atomico è ottenuto mediante pompaggio ottico laser impulsato di vapori di rubidio in cella. L'utilizzo del laser e della tecnica di interrogazione impulsata permette di ottenere una stabilità comparabile con quella del S-PHM, con un potenziale risparmio significativo sul peso e sul consumo di potenza elettrica. Inoltre essendo una tecnologia intrinsecamente più semplice ha il vantaggio di essere più robusta e affidabile rispetto a S-PHM.

Nella fase attuale dello sviluppo Leonardo ha completato la costruzione e la prima caratterizzazione, con risultati estremamente incoraggianti, di due prototipi EM del sistema fisico dell'orologio Rb-POP per lo spazio (vedi Figura 14.2).

Parallelamente alla realizzazione dei modelli EM (*Engineering Mode*l) è stata installata in Leonardo un'area dedicata per il processo di riempimento delle celle di Rubidio che rappresentano il cuore vero e proprio dell'orologio. Anche in quest'ambito si sono dimostrati risultati pienamente soddisfacenti dimostrando la capacità di Leonardo di affrontare una futura produzione in piena autonomia.

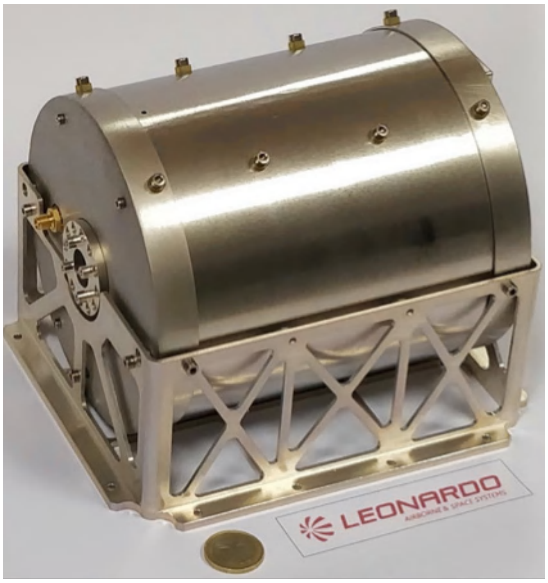


FIG. 14.2 SISTEMA FISICO DEL RB-POP PER APPLICAZIONI SPAZIO REALIZZATO IN LEONARDO.

Il successo di questo sviluppo, basato su una collaborazione tra ricerca e industria tutta italiana, consentirà di mantenere e rafforzare la posizione del nostro Paese come fornitore a livello mondiale di prodotti ad alte prestazioni per tutte le applicazioni di navigazione satellitare.

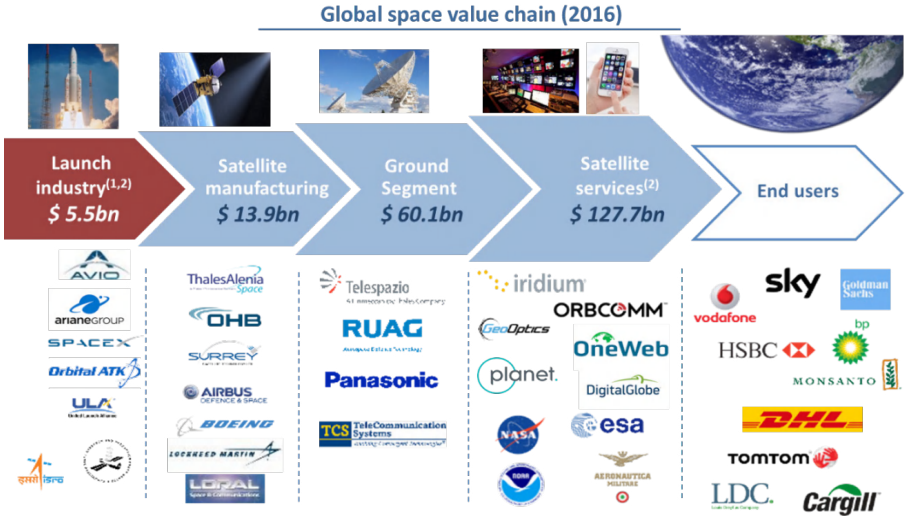
RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

È necessario un investimento dell'ordine dei 10Meuro per completare lo sviluppo dell'orologio atomico italiano spaziale RbPOP.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 15

TECNOLOGIE PER LA PROPULSIONE SPAZIALE: ELETTRICA, AVANZATA, RAMJET/SCRAMJET (VOLO IPERSONICO E 2 STAGE 2 ORBIT)

I sistemi di propulsione spaziale sono in ambito mondiale in una fase di veloce evoluzione, a valle di un periodo di relativa stagnazione e conservativismo tecnologico. Ciò è dovuto alla trasformazione della *Space Economy* di questi anni, legata a diversi fenomeni di carattere globale:



- l'intensa crescita delle applicazioni, che costituiscono la *Space Economy*, con lo spostamento della domanda di servizi dall'orbita geostazionaria (ad esempio *broadcasting*) alle orbite basse (ad esempio, osservazione della Terra, banda larga, internet delle cose). L'espansione della *Space Economy* è guidata prevalentemente da domanda commerciale, mentre i servizi per le applicazioni militari sono in fase di consolidamento;
- la corrispondente riduzione delle dimensioni medie e l'avvento di generazioni di mini, micro e nano satelliti;
- l'attenzione alle costellazioni di satelliti in orbita medio o bassa e lo sviluppo di nuovi servizi di lancio in grado di ottimizzarne lo schieramento orbitale;
- l'attenzione alle missioni di esplorazioni a basso costo;
- il rinnovato interesse per ambiziose missioni di colonizzazione, espresso dai grandi attori istituzionali (in particolare Stati Uniti e Cina) e privati (prevalentemente Stati Uniti);
- l'ingresso nel mercato dei servizio di lancio commerciali e di nuovi attori in occidente e nei paesi asiatici.

Ciascuno di questi fenomeni ha un impatto su diversi segmenti dell'industria spaziale, a cominciare dai **sistemi propulsivi**.

15.1 PROPULSIONE ELETTRICA

Nell'ultima decade la maturazione della propulsione elettrica ha permesso lo sviluppo di missioni spaziali e modalità applicative che altrimenti non sarebbero state possibili.
La propulsione elettrica, accelerando fluidi ionizzati (tipicamente Xenon o altro gas nobile) attraverso campi elettrici o magnetici produce spinte con un impulso specifico (la velocità con cui il propellente viene espulso dal propulsore) elevatissimo rispetto ai propulsori chimici tradizionali, permettendo un significativo risparmio di propellente. L'entità della spinta è direttamente proporzionale alla potenza elettrica immessa nel propulsore, e tipicamente è nel *range* delle decine o centinaia di milli-Newton, molto inferiore ad un propulsore chimico.
Per la natura dei fenomeni fisici coinvolti, la propulsione elettrica è una tecnologia di propulsione che può essere proficuamente utilizzata solo in orbita (*in-orbit propulsion*), in condizioni di vuoto. Ciò implica che anche gli sviluppi tecnologici e le procedure di qualifica e di accettazione richiedono impianti a vuoto con sistemi di pompaggio in grado di gestire flussi di propellente fino alle decine di milligrammi per secondo, in modo da garantire una pressione operativa durante i test almeno dell'ordine dei $5*10^{-5}$ mbar.
Uno schema generale di un sistema di propulsione elettrica è mostrato in Figura 15.1.1

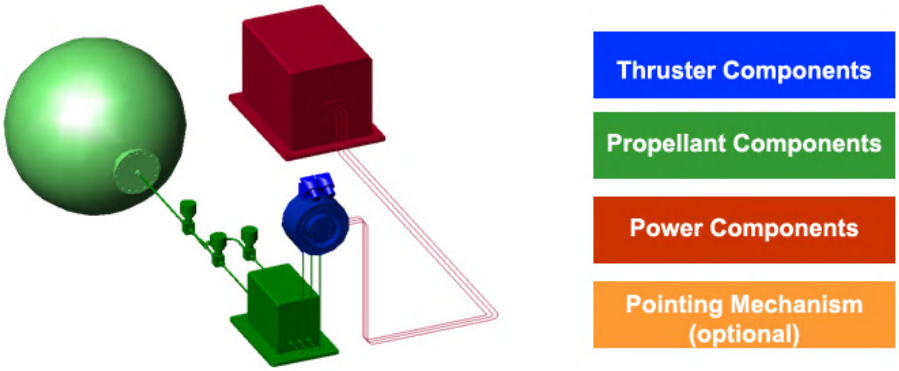


FIG. 15.1.1 SISTEMA DI PROPULSIONE ELETTRICA: BLOCCHI FUNZIONALI PRINCIPALI (CREDIT ESA).

I **Propulsori Elettrici** (*thruster components*) sono sottosistemi composti da una parte anodica (il propulsore vero e proprio) e uno o più catodi/neutralizzatori. L'assemblato è generalmente riferito come "**propulsore**" o "***thruster unit***". I propulsori sono generalmente classificati in tre famiglie: Elettrostatici, Elettromagnetici e Elettrotermici. Sono i primi due a rivestire il maggiore interesse, in quanto a parità di potenza forniscono le prestazioni migliori in termini di impulso specifico.

I **propulsori Elettrostatici** sono quelli i cui ioni, una volta generati e a prescindere dal meccanismo di generazione, vengono accelerati dalla forza di Coulomb di un campo elettrico applicato nella direzione dell'accelerazione. Tra questi tipi di propulsori, le tecnologie maggiormente sviluppate sono gli **HET** (*Hall Effect Thruster*), i **GIE** (*Gridded Ion Engines*), gli **HEMPT** (*Multi stage plasma thruster*) e i **FEEP** (*Field-Emission Electric Propulsion Thrusters*).
Gli HET, i GIE e gli HEMPT hanno in comune il fatto che al loro interno viene iniettato un *fluido neutro*, (generalmente un gas nobile come lo Xenon (Xe) in alternativa il Krypton (Kr), che viene ionizzato attraverso la collisione di elettroni emessi da un catodo e accelerati da un *campo elettrostatico*.
Queste tre tipologie di propulsori sono anche dotati di un *campo magnetico* che esercita una funzione diversa a seconda della tecnologia: blocco e concentrazione degli elettroni emessi dal catodo e confinamento del fascio di plasma per aumentarne la densità e l'efficienza e diminuire i fenomeni di erosione, a carico di ceramiche isolanti nel caso di HET e HEMPT, e delle griglie per i GIE. L'*erosione* è uno dei principali fattori limitanti della vita operativa di un propulsore elettrico, tanto che uno dei campi di sviluppo dei propulsori HET è volto a definire topologie di campo magnetico (dette "***magnetic shielding***") in grado di ridurre al minimo questo fenomeno.
I propulsori FEEP invece utilizzano un *metallo liquido* come propellente (Cesio o Indio), che viene ionizzato ed accelerato applicando una differenza di potenziale dell'ordine dei 10kV tra due elettrodi.
I **propulsori Elettromagnetici** sono quelli i cui ioni vengono accelerati o mediante la forza di Lorentz o mediante un *campo elettromagnetico*, il cui campo elettrico corrispondente non è allineato alla direzione di accelerazione. Tra questi tipi di propulsori vengono classificati i propulsori del tipo **HPT** (*Helicon Plasma Thrusters*), **MPD** (*Magneto Plasma Dynamic Thrusters*), **PPT** (*Pulsed Plasma Thrusters*) e il **VASIMIR** (*Variable Specific Impulse Magnetoplasma Rocket*). PPT e HPT hanno un livello di maturità tecnologica elevato (fino ad essere stati testati in volo), MPD e VASIMIR al momento sono in fase di sviluppo a terra anche perché in genere richiedono potenze delle decine o centinaia di kW, difficilmente disponibili sui satelliti attuali.
I propulsori *Elettrostatici* ed *Elettromagnetici* sono caratterizzati da *spinte relativamente basse*, se comparate con i più tradizionali razzi che usano reazioni chimiche per generare una spinta. L'ordine di grandezza tipico è quello del milli-Newton (da 1 mN a 500 mN). L'impulso specifico, grazie alla elevata velocità di uscita degli ioni, è invece molto elevato: si va da 10.000 Ns/kg a 40.000 Ns/kg (di gran lunga superiore a quello dei razzi chimici). L'utilizzo dei propulsori elettrici richiede quindi la revisione dell'approccio operativo alla missione, ma garantisce benefici tutt'altro che trascurabili in termini di efficienza.
I **propulsori Elettrotermici** sono una categoria di motori in cui un *campo elettromagnetico* genera un *plasma*, in maniera tale da riscaldare il propellente (o i gas derivati dalla combustione) aumentando così la sua energia cinetica prima dell'espansione in un ugello. Questi sistemi propulsivi (**resistogetti** o **arcogetti** a seconda di come il gas viene energizzato) hanno caratteristiche operative più simili a quelle dei razzi chimici (impulso specifico relativamente basso e spinta relativamente alta), e oltre ad avere un loro ruolo su piattaforme tradizionali "chimiche", possono rappresentare un interessante complemento ai propulsori elettrostatici o elettromagnetici in piatta-

forme "***all-electric***" per manovre orbitali ausiliarie (come ad es. *de-orbiting* e *collision avoidance*). Oltre al propulsore, altri blocchi funzionali fondamentali per un sistema di propulsione elettrica sono la ***Power and Processing Unit*** **(PPU)** e il ***Propellant Management Assembly*** **(PMA)**.

La **PPU** rappresenta l'apparato di gestione e controllo della potenza, ed è estremamente critico per quanto riguarda i tempi e i costi dello sviluppo del sistema propulsivo. La PPU ha una architettura differente se si considerano le diverse tecnologie propulsive, in termini soprattutto di transienti di accensione e spegnimento, instabilità della scarica e voltaggi da gestire (con i propulsori HET alimentati generalmente a tensioni tra i 250 e i 500 V, i GIE fino a 2000 V e gli HEMPT a tensioni intermedie tra i due precedenti), mentre la **PMA** - che deve gestire il propellente stoccato nei *tank* ad alta pressione (in genere sopra i 150 bar), ridurre la pressione stessa a valori operativi (attorno ai 3 bar) e indirizzare la portata di massa richiesta ad anodo e catodo - ha notevoli analogie costruttive ed operative in tutte le tecnologie di propulsione elettrica, a parità di propellente utilizzato.

Gli ambiti di ricerca e sviluppo per la propulsione elettrica sono variegati; oltre all'industrializzazione dei processi di assemblaggio e prove di accettazione per la **produzione di massa** che risponde alle crescenti esigenze di costellazioni di centinaia o migliaia di satelliti (*OneWeb, TeleSat, Starlink*), vi è una crescente attenzione all'uso di **propellenti alternativi** allo Xe, anche in questo caso in un'ottica di riduzione dei costi ricorrenti per il cliente finale, oltre alle ricerche come il già menzionato ***magnetic shielding*** dei propulsori Hall, modifica della topologia del campo magnetico che preserva la ceramica di isolamento del canale di ionizzazione e aumenta la vita operativa del propulsore stesso. Le potenze in gioco per le tre tecnologie più consolidate (HET, GIE e HEMPT) variano da un centinaio di Watt a 5 kW, ma vi sono progetti avanzati per lo sviluppo di propulsori a potenza di qualche decina di Watt (per *cubesat*) e oltre i 20 kW (per le piattaforme di trasporto spaziale e di esplorazione del Sistema Solare, i cosiddetti ***Space Tug***).

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

I **satelliti per telecomunicazioni** in orbita *geostazionaria* sono stati tra i primi ad utilizzare la propulsione elettrica dal punto di vista commerciale, dapprima per le manovre di controllo di assetto e di *station keeping* (mantenimento della posizione) e adesso anche per quelle di *orbit raising* (innalzamento dell'orbita da quella di rilascio fino a quella operativa). Molti dei satelliti geostazionari lanciati negli ultimi anni sono della tipologia "*all-electric*", ossia utilizzano propulsori elettrici per tutte le manovre orbitali.

Anche i **satelliti per l'Osservazione della Terra** operanti in orbita bassa possono beneficiare grandemente della propulsione elettrica: dovendo essi compensare gli effetti della resistenza aerodinamica (*drag*) atmosferica, hanno bisogno di *spinta continua* per mantenere l'orbita di missione. Il caso del satellite GOCE è paradigmatico: la missione scientifica è stata possibile solo grazie all'utilizzo di un sistema di propulsione a ioni.

I **satelliti per l'esplorazione** sono una terza categoria di piattaforme che può sfruttare le caratteristiche di elevato impulso specifico (e di conseguenza di elevato delta-V) derivante dalla propulsione elettrica. Un esempio molto conosciuto è la missione SMART-1, che nel 2006 ha rappresentato il primo esempio di satellite a propulsione elettrica che ha raggiunto l'orbita lunare dal punto

di rilascio (GTO, *Geostationary Transfer Orbit*) usando meno di 60 kg di Xenon.
Uno scenario nuovo è rappresentato dalle cosiddette **mega-costellazioni** di centinaia di piccoli satelliti in orbita LEO o MEO. In tutte le mega-costellazioni è richiesto un sistema propulsivo a bordo, sia per raggiungere l'orbita operativa, sia per liberare lo slot orbitale alla fine della vita utile del satellite (*de-orbiting*). Nella quasi totalità dei casi le mega-costellazioni prevedono propulsione elettrica a bordo, con taglie di potenza nel *range* 100 W – 1000 W.
Ancora più giovane è il segmento della propulsione per ***cubesat***, ambito nel quale è richiesta una miniaturizzazione estrema dei sistemi, ed una elevata efficienza nello sfruttare i pochi Watt disponibili a bordo. Sistemi propulsivi (sia elettrici che chimici) delle dimensioni totali di 1 U (una unità di *cubesat*, 100x100x100 mm) sono in fase di sviluppo presso molte aziende. Questi due nuovi segmenti di mercato richiedono un drastico cambio di paradigma progettuale e produttivo, considerati i numeri in gioco (centinaia di sistemi per ciascuna costellazione), il rateo di produzione (decine di sistemi al mese) e i *target price* cui mirano gli integratori (almeno un ordine di grandezza in meno rispetto a sistemi di propulsione elettrica tradizionali).
In tutti gli scenari di missione descritti la propulsione elettrica permette di **ottimizzare l'uso del propellente** a bordo, **riducendo la massa complessiva** del satellite o **prolungandone significativamente la vita operativa**.
L'utilizzo significativo della propulsione elettrica al posto di quella chimica tradizionale sta generando una competizione serrata tra i principali attori globali nel campo delle piattaforme satellitari ma soprattutto nello sviluppo delle singole tecnologie. L'Europa e l'Italia in particolare, che per anni ha rivestito un ruolo d'avanguardia nell'ambito della propulsione elettrica, sta soffrendo adesso di un'aggressione sia tecnica che commerciale da parte degli USA che per primi, nel 2015, sono riusciti a proporre sul mercato una piattaforma per telecomunicazioni completamente elettrica. La risposta europea è nelle piattaforme Electra di OHB e nel *bus Neosat* di Thales Alenia Space-Airbus. Questi satelliti utilizzano propulsori elettrici (peraltro al momento di fabbricazione russa) per tutte le manovre orbitali (***satellite all-electric***). Le piattaforme per le telecomunicazioni hanno guidato fino ad oggi lo sviluppo del settore della propulsione elettrica, definendone i requisiti fondamentali in termini di potenza utilizzabile e spinta richiesta. Lo standard attuale (sistemi propulsivi basati su *thruster* HET o GIE da 5 kW) è in via di ridefinizione sia perché la potenza disponibile a bordo aumenta di anno in anno, sia per far fronte a missioni nuove come il *Deep Space Gateway*, il cui modulo propulsivo (che verrà sviluppato da Maxar negli USA) si baserà su 4 propulsori Hall da 13,5 kW di potenza. Per applicazioni di trasporto ancora più sfidanti (ad esempio missioni cargo verso Marte) sono in avanzata fase di sviluppo sistemi propulsivi che si basano su *thruster* da 20 kW e oltre.
Nel segmento della bassa potenza come già accennato lo sviluppo del settore della propulsione elettrica è principalmente guidato dai requisiti definiti dalle **mega costellazioni**. Il *range* di potenza interessato va dai 100 ai 1000 W e i tassi di produzione richiesti arrivano a 30 sistemi completi al mese. Ciò richiede una re-ingegnerizzazione completa dell'intero processo di produzione, assemblaggio e accettazione del prodotto, una ottimizzazione dei flussi di logistica ed un massiccio ricorso alle tecnologie di *advanced manufacturing* (ad esempio, il *3D printing* e le tecnologie di trattamento superficiale basate su nano componenti).

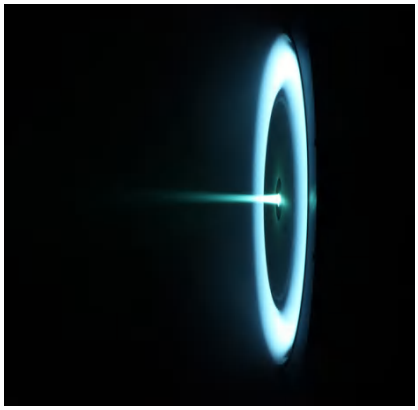


FIG.15.1.2 IL PROPULSORE HT20K DI SITAEL (20 KW DI POTENZA, 1 N DI SPINTA) IN CONFIGURAZIONE "MAGNETIC SHIELDING", OPERATO CON XENON NELLA FACILITY IV10. (CREDIT SITAEL S.P.A)

Altro elemento fondamentale per i sistemi propulsivi elettrici è il propellente utilizzato. I costi dello Xenon (attorno ai 2.000 Euro al kg) impattano notevolmente sia nel processo di qualifica del sistema propulsivo, sia nel prezzo ricorrente di un sistema pronto all'integrazione sul satellite. L'uso di propellenti alternativi allo Xenon diventa quindi un elemento strategico per la commercializzazione di questi sistemi.

All'interno della comunità spaziale Europea, l'Italia è uno dei paesi che maggiormente ha contribuito allo sviluppo dei sistemi di propulsione elettrica, coprendo trasversalmente tutte le tecnologie riportate nel paragrafo precedente e, cosa importante, sviluppando tutti gli equipaggiamenti necessari: propulsori, PPU e componenti fluidici, ma anche camere di prova, diagnostica dedicata e propellenti alternativi allo Xenon, un gas presenta buone caratteristiche di ionizzazione unite alla elevata efficienza volumetrica di immagazzinamento, grazie alle sue caratteristiche di fluido super-critico. Ma questo gas, oltre a essere molto raro in natura, e per questo anche molto costoso, vede un bilancio domanda/offerta negativo, senza considerare l'incremento del suo utilizzo in campo spaziale. È fondamentale quindi sviluppare la capacità di utilizzare propellenti alternativi, con caratteristiche simili allo Xenon ma maggiormente disponibili, con i propulsori attualmente esistenti o adattarli al loro utilizzo, come, per esempio, il Krypton, l'anidride carbonica e lo Iodio.

L'apparato di gestione e controllo della potenza - la PPU - diventa all'interno di un sottosistema di propulsione elettrica il componente più critico in termini di costi e tempi di realizzazione. Fra gli obiettivi sfidanti degli sviluppi in corso in tutto il mondo vi sono l'adozione di moduli funzionali standard, la minimizzazione delle modifiche per la gestione di diversi tipi di motori e l'adozione di soluzioni tecnologiche atte ad aumentare le prestazioni di efficienza pur contenendo massa e volume. L'utilizzo di tecniche di commutazione allo stato dell'arte e l'accurata selezione di componenti elettronici, così come l'utilizzo di trasformatori planari e le tecnologie basate su componenti GaN, sono le basi dello sviluppo richiesto per la maturazione di questo prodotto. L'uso di componenti elettronici COTS di derivazione *automotive* è un altro obiettivo che viene perseguito, soprattutto nel segmento della bassa potenza e delle mega-costellazioni. Sul fronte della gestione di potenze medio alte (oltre i 5 kW), si sta facendo strada anche l'architettura "*direct drive*", che prevede di alimentare direttamente il sistema di propulsione a partire dai pannelli solari, mi-

nimizzando la complessità, il peso e i costi della PPU. Questa architettura, molto promettente in linea di principio, richiede però un massiccio investimento in termini di ricerca e sviluppo sui *bus* satellitari (che dovrebbero essere portati dagli attuali 100 V almeno a 300 V) e su tutta la catena elettrica, a cominciare dai pannelli solari.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Si stima che dal 2020 almeno il 50% dei satelliti Geostazionari saranno equipaggiati con sistemi propulsivi elettrici. Tale percentuale è destinata ad aumentare sensibilmente negli anni futuri con il parallelo incremento di potenza a bordo dei veicoli.

Tra le varie tecnologie di propulsione elettrica sviluppate, quella degli *Hall Effect Thrusters* (**HET**) domina il mercato dei satelliti GEO. Dopo una prima generazione di sistemi della classe da 1.5 kW (Fakel SPT100, Safran PPS-1350) attualmente tutte le maggiori industrie del settore stanno qualificando nuovi sistemi propulsivi della classe di potenza 5kW (Fakel SPT140, Safran PPS5000, Aerojet BPT4000, SITAEL HT5k).

Per i **GIE**, la competizione in Europa vede due grandi *player* sul campo: QinetiQ con i propulsori T5 (utilizzato su GOCE) e T6 (attualmente impiegato nella missione Bepi Colombo), e Ariane Group con i RIT. Le due tecnologie si differenziano per lo stadio di ionizzazione del propellente: i propulsori di QinetiQ utilizzano il bombardamento elettronico, i RIT si basano su radiofrequenze. A livello globale Aerojet (USA) è il fornitore dei propulsori a griglia NEXT, anche essi basati sul bombardamento elettronico per la fase di ionizzazione.

La tecnologia **HEMPT** è invece uno sviluppo proprietario di Thales Electron Devices (Germania). Si basa su una serie di stadi magnetici, che dovrebbero garantire elevata efficienza e ridotta erosione delle ceramiche protettive del canale di ionizzazione.

Il segmento della bassa potenza è relativamente giovane, ma in pieno fermento per rispondere alle esigenze delle mega-costellazioni e dei *cubesat*. Tra gli attori emergenti possiamo elencare le *startup* Apollo Fusion (USA), Exotrail (Francia), Phase Four (USA), Enpulsion (Austria), ThrustMe (Francia) e Avant Space (Russia), che si affiancano ad aziende consolidate come Fakel (Russia), Safran (Francia), Busek (USA) e SITAEL (Italia). In questo scenario l'attuale sfida dell'industria italiana, è duplice: da una parte supportare la crescente domanda di potenza da parte delle piattaforme geostazionarie e di trasporto spaziale per favorire un aumento di prestazioni delle stesse, dall'altra ottimizzare le prestazioni di sistemi propulsivi di bassa potenza (centinaia di W) e garantire i ratei di produzione e i prezzi che le mega costellazioni stanno cercando di imporre.

Per quanto riguarda la progettazione e produzione di propulsori Hall, SITAEL ha una *leadership* riconosciuta nel segmento della bassa potenza (sotto il kW), e in quello delle altissime potenze (20kW e oltre). Il propulsore HT100 (potenza nominale 175W) verrà validato in orbita nel 2019, nell'ambito della missione nazionale *μHETSat*, mentre il propulsore HT20k viene sviluppato con finanziamenti ASI e H2020. L'azienda pugliese ha anche competenze riconosciute nel segmento della micro propulsione (**FEEP**) e in quello dei propulsori MPD da centinaia di kW.

Il CIRA di Capua ha recentemente attrezzato un laboratorio di propulsione elettrica (*Facility Medium Scale Vacuum Chamber*) a supporto dell'industria nazionale, nel quale porterà avanti lo sviluppo di un mini propulsore Hall di laboratorio con potenza nominale di 250W (Fig).



FIG 15.1.3 FACILITY MSVC (A SINISTRA); MOTORE CR-HET 250 (A DESTRA). (CREDIT CIRA)

Oltre a questa tecnologia consolidata, in Italia si sono sviluppati, o sono in fase di sviluppo, motori a radio-frequenza basati su antenna elicoidale (**Helicon Plasma thrusters**, HPT), per i quali esistono prototipi a partire da 30W fino a 1kW presso l'Università di Padova e lo *Spin-Off* T4i, che ne sta curando l'industrializzazione. Caratteristica di questa tecnologia è la semplicità architetturale e la possibilità di impiegare diversi propellenti (Xenon, Kripton, CO_2, Iodio etc.). Con particolare riferimento ai micro satelliti (da 6 a 50 kg), T4i sta sviluppando REGULUS, un'unità propulsiva completa che combina un propulsore HPT con iodio allo stato solido come propellente. Il motore è integrato in un assemblato che include l'elettronica, la fluidica e il propellente in una unità di 1.5U, con una massa totale al di sotto dei 3kg. Il motore fornisce 0.6mN di spinta ed ha un impulso specifico di 600s a 50W con una potenza elettrica in ingresso dal satellite di 50W. L'impulso totale è invece di 3000Ns. Oltre alla versione di 1.5U, T4i sta sviluppando anche una versione di dimensioni maggiori (2U), con un impulso totale di circa 11.000Ns. Il sistema è concepito per essere "*Plug and Play*", per evitare complesse e dispendiose procedure di integrazione, ed è basato su componenti COTS per ridurre drasticamente i costi di produzione, rendendola quindi un'unità adatta al settore delle micro piattaforme satellitari. Tutti i sottosistemi elettrici e fluidici sono frutto di un design originale di T4i.

Le caratteristiche principali di REGULUS sono:

- una architettura semplice, che consiste in una camera di scarico, un'antenna e un sistema magnetico;
- assenza di neutralizzatore e di griglie;
- propellente solido ad altissima densità.

REGULUS, che attualmente si trova nella fase di qualifica, sarà testato in volo in Q2 2020.

Un segmento del tutto nuovo e molto promettente per quel che riguarda la propulsione elettrica è quello dell'***air-breathing***, ovvero dell'utilizzo degli atomi di ossigeno ed azoto -ancora presenti ad altitudini tra i 160 ed i 250 km di quota - come propellente per un propulsore elettrico.

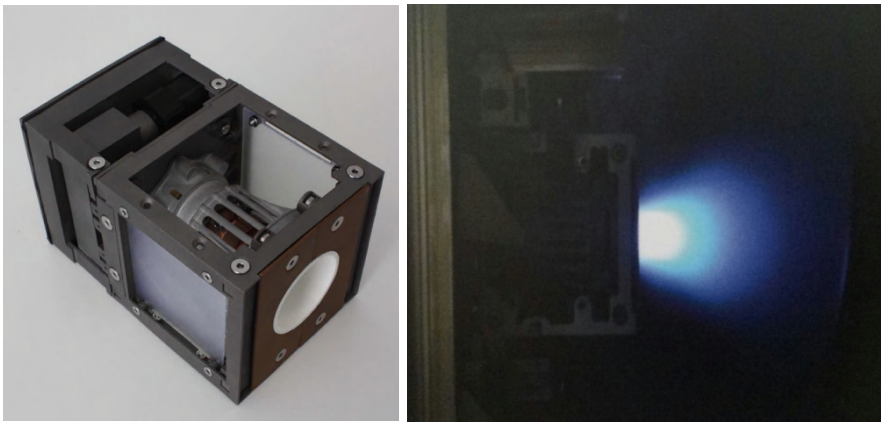


FIG.15.1.4 A SINISTRA, IL SISTEMA REGULUS COMPLETO, DA 1.5 U, PRONTO PER L'INTEGRAZIONE SUL CUBESAT. A DESTRA, L'HPT OPERATO IN VUOTO NELLE FACILITIES DI T4I. (CREDIT T4I SRL).

In questo ambito l'Italia è all'avanguardia a livello mondiale: il concetto è stato sperimentalmente provato per la prima volta al mondo da SITAEL nel 2017, e teoricamente permette di realizzare un satellite che riesce a orbitare a quote molto basse (VLEO) per un tempo indefinito, senza bisogno di serbatoi di propellente.

Considerando la scala di potenze investigata negli ultimi decenni si prevede che la prossima classe di propulsori di alta potenza sarà rappresentata dai modelli da 20kW e oltre. In questo momento esistono in Europa cinque grandi impianti di prova, di cui quattro in Italia (uno in SITAEL a Pisa, 3 in Aerospazio Tecnologie a Siena) ed 1 in Germania (DLR-Gottinga), in grado di ospitare *test* significativi di propulsori di potenza superiore ai 10kW. Il CIRA di Capua ha in progetto di realizzare, nel prossimo futuro, un impianto di prova con capacità di pompaggio adatta a sistemi di alta potenza (*Large Scale Vacuum Chamber*).

Gli *impianti di prova* sono un *asset* nazionale importante, che va consolidato. L'offerta italiana di impianti di test non ha eguali in Europa e può competere come prestazioni anche con gli impianti NASA. Il laboratorio di Aerospazio Tecnologie a Siena ospita nei suoi impianti test di qualifica di propulsori europei e russi e possiede anche una delle poche *facilities* al mondo per i test di compatibilità elettromagnetica su propulsori elettrici. L'impianto IV10 di SITAEL a Pisa, ha invece una delle maggiori capacità di pompaggio dinamico al mondo e grazie al livello di vuoto ottenibile permette di provare i propulsori in un ambiente molto simile al vuoto spaziale.

Tutte le iniziative di sviluppo che potrebbero essere definite in ambito nazionale, si coordinano sinergicamente con i programmi ESA e con programmi di sviluppo Europeo in ambito H2020. Per quanto riguarda la propulsione elettrica è stato infatti istituito uno *Strategic Research Cluster*, che ha dato vita a **EPIC** (*Electric Propulsion Innovation and Competitiveness*), che a sua volta gestirà programmi di sviluppo orientati a due obiettivi diversi:

- migliorare le prestazioni, l'efficienza e la competitività delle attuali tecnologie consolidate (HET, GIE e HEMPT);

- sviluppare tecnologie meno mature (HPT, MPD, FEEP), al di fuori di quelle che appartengono al filone precedente e che possano essere applicate a qualsiasi tipo di missione.

Il *budget* a disposizione non è equamente diviso nei due ambiti di intervento, ma principalmente dedicato al miglioramento della competitività in ambito telecomunicazioni, lasciando una parte trascurabile alle nuove tecnologie.
In Italia, la propulsione elettrica del tipo HET di classe 5kW è la *baseline* per il programma nazionale Ital-GovSatCom. Il programma, coordinato da Thales Alenia Spazio in Italia, coinvolge anche Telespazio, SITAEL, Space Engineering e Leonardo, e ha come obiettivo la realizzazione e il lancio di una piattaforma satellitare per telecomunicazioni istituzionali sicure. Il programma è stato appena approvato da ASI e prenderà l'avvio nella seconda metà del 2019.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

Lo sviluppo di un sistema di propulsione elettrica "convenzionale", operato a Xenon, ha costi di qualifica direttamente proporzionali alla potenza in gioco, che a sua volta è direttamente legata alla massa di propellente che viene accelerata.
Per dare un'idea degli ordini di grandezza, la qualifica a terra di un propulsore di classe 5kW ha un costo di **solo propellente** di 1,5 milioni di Euro ogni 10.000 ore, che per un propulsore da 20kW arrivano a 5,2 milioni di Euro ogni 10.000 ore.

A questi costi si aggiungono quelli per lo sviluppo e la qualifica degli altri sottosistemi, fino ad arrivare a un totale che oscilla tra i 5 milioni di Euro per un sistema di bassa potenza, a oltre i 20 milioni per sistemi da 20kW. Da tenere presenti anche i tempi necessari alla qualifica: spesso le prove di vita di propulsori elettrici hanno durate ben superiori all'anno, e necessitano di impianti e personale dedicato a tempo pieno.
Riduzioni drastiche del costo di qualifica si ottengono utilizzando propellenti alternativi, come il Krypton (il cui costo al litro è un ordine di grandezza inferiore a quello dello Xenon), oppure utilizzando lo strumento della validazione/dimostrazione in orbita (*In-orbit Validation/In-orbit Demonstration, IoV/IoD*), che delega alla prima missione la qualifica del sistema.

15.2 PROPULSIONE AVANZATA

La **Propulsione *Green*** ha come obiettivo quello di trovare propellenti *alternativi* rispetto ai sistemi mono e bi-propellente basati sull'idrazina (nell'eventualità che sia l'idrazina che MMH/UDMH/NTO vengano inserite nella lista di priorità dell'annesso XIV del REACH), al fine di ridurre l'impatto ambientale, i rischi connessi all'utilizzo (tossicità), la reattività (riaccensioni non programmate), il costo degli stessi propulsori, mantenendo nel contempo livelli di performance adeguati per il tipo di missione (Impulso specifico (Isp)>300).
I propulsori basati su questo tipo di propellente possono essere impiegati per manovrare un satellite o un veicolo spaziale attorno ad un pianeta o durante missioni interplanetarie e per tutta un'altra serie di operazioni, quali: *North-South / East-West station keeping,* voli in orbita bassa, *orbital re-phasing, de-orbiting, docking / rendez-vouz,* rientro, controllo di assetto e trasferimento orbitale.

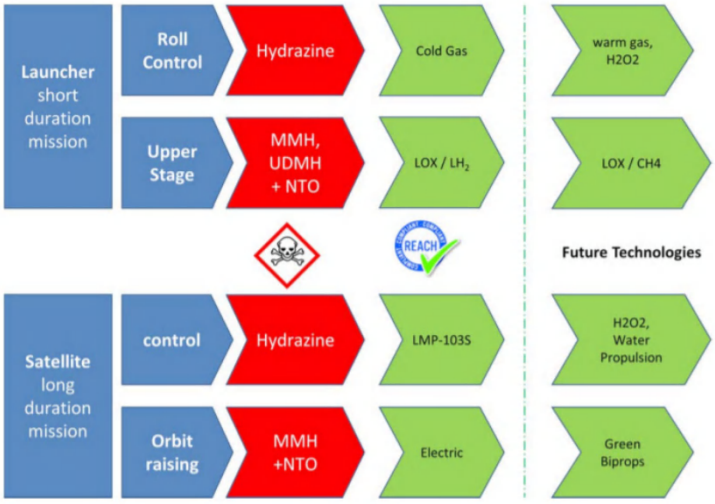


FIG.15.2.1 AREE TECNOLOGICHE DI SVILUPPO PROPULSIONE GREEN (GOTZIG, CHALLENGES AND ECONOMIC BENEFITS OF GREEN PROPELLANTS FOR SATELLITE PROPULSION, EUCASS 2017).

La sostituzione dei propellenti stoccabili tossici è di natura prioritaria, essendo critica per la continuità dell'indipendenza europea per l'accesso allo spazio e abilitante per lo sviluppo di servizi di lancio e di satelliti a basso costo.
Per le applicazioni su **sistemi di controllo di assetto** risulta promettente, ma immaturo, l'utilizzo di propellenti basati su soluzione acquose di sali energetici come la dinitrammide di ammonio

(ADN) o l'idrato di idrossilammonio (HAN). In entrambi i casi, si tratta di propellenti con implicazioni industriali non risolte: estremamente costosi, derivati da sostanze esplodenti, con un livello di tossicità residua non trascurabile. Più mature, ma con un livello di prestazioni limitato, sono le applicazioni basate sulla decomposizione catalitica dell'acqua ossigenata (di-idrossido di di-idrogeno) ad elevata concentrazione (es. 95-98%) o del diossido di azoto: in questo caso, le difficoltà da superare sono legate alla messa a punto di stabilizzatori, che limitino la dissociazione spontanea termica o catalitica, alla complessità logistica (es. produzione, trasporto e caricamenti) di propellenti ad alto titolo e generalmente ai bassi impulsi specifici ottenibili. In alternativa ai sistemi monopropellenti per il controllo di assetto, sono stati dimostrati recentemente sistemi bipropellenti verdi ad accensione comandata. In questo caso sequenze di piccoli impulsi (necessari per il controllo di assetto in condizioni di microgravità) possono essere ottenuti comandando elettricamente l'accensione in camera di combustione di miscele di propellenti non ipergolici allo stato gassoso (ad es. Ossigeno e Metano). I sistemi che ne derivano sono più complessi dei monopropellenti e richiedono l'impiego di propellenti gassosi, ma sono più efficienti in quanto offrono un impulso specifico doppio rispetto all'acqua ossigenata (H_2O_2).

Per i **sistemi propulsivi orbitali "verdi"** (ad es. utilizzati per raggiungere il perigeo o l'apogeo, in genere per i cambi di parametri orbitali, per compensare le perdite per attrito, per il rientro) le alternative ai propellenti stoccabili tossici sono ancora poco mature. Si tratta in genere **di sistemi bipropellente**, basati su coppie di sostanze allo stato liquido o gelificato che reagiscono in una camera di combustione. Nella tabella 15.2.1 sono elencate le più promettenti, per sistemi propulsivi di spinta tra 1KN e 20KN, con impulso specifico superiore ai 300s, che coprono le esigenze dei principali casi di uso in Europa, per carrozze satellitari, stadi alti di veicoli di lancio e navette orbitali.

OSSIDANTE	COMBUSTIBILE	ACCENSIONE	PRESSURIZZAZIONE
DI-IDROSSIDO DI DI-IDROGENO	KEROSENE	COMANDATA	REGOLATA
DI-IDROSSIDO DI DI-IDROGENO	KEROSENE CATALIZZATO GEL	IPERGOLICA	REGOLATA
DI-OSSIDO DI AZOTO	ETILENE-ETANO	COMANDATA	INTRINSECA
DI-IDROSSIDO DI DI-IDROGENO	ETANOLO	COMANDATA	REGOLATA

TAB. 15.2.1 REAGENTI PIÙ PROMETTENTI IN CAMERA DI COMBUSTIONE PER SPINTE COMPRESE TRA 1KN E 20KN

Le caratteristiche propulsive attese dai sistemi indicati sopra sono confrontabili (ma in genere non migliori) di quelle dei sistemi stoccabili tradizionali: requisiti di riaccensione, modularità della spinta e riutilizzabilità sono raggiungibili con una concezione opportuna del sistema e degli elementi principali. La maturazione tecnologica, lo sviluppo e l'industrializzazione di una delle soluzioni identificate è un obiettivo prioritario in Italia e in Europa.

La **propulsione ibrida** e **la propulsione criogenica a metano liquido/ossigeno liquido,** hanno subito recentemente un impulso significativo al loro sviluppo.

La **Propulsione Ibrida,** prevede l'utilizzo di propellente solido e ossidante fluido, e permette di raggiungere il non trascurabile obiettivo di realizzare motori a *spinta modulabile* e intrinsecamente *sicuri*, in quanto le due fasi della miscela non sono fisicamente a contatto e si elimina completamente il rischio di detonazione.

La scelta del combustibile ricade principalmente sulle paraffine data la loro buona velocità di regressione, e sull'*Hydroxyl-terminated polybutadiene* (HTPB), mentre la scelta dell'ossidante dipende dalle prestazioni richieste e dalle condizioni operative: perossido di idrogeno (H_2O_2) ad alta concentrazione (> 98%), protossido di azoto, ossigeno liquido.
Le necessità di sviluppo per raggiungere gli obiettivi descritti nel paragrafo successivo investono principalmente le aree tecnologiche citate di seguito:

- camere di combustione fino a 150kN, passando per una prestazione intermedia quale 30kN con un impulso totale >106Ns;
- grani di paraffina associati alle prestazioni di cui sopra. La paraffina da una parte porta a avere prestazioni maggiori (velocità di regressione maggiori), dall'altra richiede attenzioni particolari quando si vogliono realizzare grani di grandi dimensioni, in quanto le sue prestazioni meccaniche diventano critiche. Per i tempi di sparo e le spinte previste le dimensioni dei grani possono superare il metro;
- dispositivi di modulazione del flusso di ossidante, del tipo venturi cavitante, a sezione variabile, che permettano di limitare o sopprimere fenomeni di instabilità di bassa frequenza che sono tra le principali cause di fallimento dei motori ibridi;
- concentratori di perossido di idrogeno che, a partire da una concentrazione di facile reperibilità commerciale e a basso costo, riescano a produrre in modo economico quantità significative di perossido a concentrazioni elevate, così da soddisfare le esigenze dei motori della taglia sopra descritta, senza dilatarne i tempi di attesa (es. 5kg/ora per un concentratore di perossido fino al 98%) ed esigere laboratori e dispositivi di prova motori ad alte prestazioni.

Un altro settore di primaria importanza è quello dei **motori criogenici a metano e ossigeno liquidi (LO_X/LCH_4)**. Questa tecnologia si sta affermando come un *asset* tecnologico per i lanciatori e per il trasporto spaziale di futura generazione. Il metano, ad oggi, risulta essere una scelta interessante per quanto riguarda i propellenti per razzi a liquido in quanto, oltre a garantire buone prestazioni del sistema propulsivo, è caratterizzato da facilità di stoccaggio, bassa pericolosità e nessuna tossicità; inoltre i costi di estrazione e condizionamento sono piuttosto contenuti. L'uso di metano è di particolare interesse per le missioni marziane, dove si può estrarre metano sia dall'atmosfera che dalla superficie del pianeta. A supporto di questa applicazione è di fondamentale importanza sviluppare i gruppi turbopompa per *liquidi criogenici*, estendendo le già consolidate esperienze e conoscenze esistenti in Italia, unitamente alla realizzazione e prova di dimostratori di camere di spinta rigenerative che, a partire da una spinta di 10kN, possano avvicinarsi ai valori di un motore di volo, realizzando dapprima valori intermedi da 30kN e poi i 100kN previsti per un motore di stadio alto (orizzonte 2021) con ciclo termodinamico chiuso, e successivamente, con cicli termodinamici diversi, ai livelli di spinta tra i 600 e 1200 KN necessari per gli stadi bassi di veicoli di lancio parzialmente riutilizzabili con orizzonte 2030.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Propulsione Green. Si punta a propellenti che abbiano un basso impatto CMR (*Carcinogenic, Mutagenic or Toxic for Reproduction*) e PBT (*Persistent, Bioaccumulation and Toxicity*) e questo

giustifica la dicitura di **propulsione *green***. L'uso di tali propellenti (come il nitrato idrossilammonio - AF-M-315E e come l'Ammonium Dinitramide LMP-103S) permetterà di semplificare le operazioni di movimentazione del propellente e del suo caricamento nei serbatoi del velivolo, garantendo una maggiore sicurezza al personale coinvolto, con conseguente riduzione dei costi.

Propulsione Ibrida. Offre semplicità, affidabilità e complessivamente costi di sviluppo e di funzionamento più bassi rispetto ai sistemi di propulsione liquida, assieme a una discreta sicurezza di impiego, nonché di regolazione della spinta e capacità di riaccensione.

La soluzione a propellenti ibridi potrebbe essere vantaggiosa per una serie di applicazioni:

- lanciatori di piccole dimensioni, estremamente versatili e poco costosi, con la capacità di portare in orbita bassa carichi dell'ordine di 50kg – 80kg;
- velivoli suborbitali, anche *manned*;
- sistemi di propulsione per il *soft landing* planetario (es. Marte e Luna);
- terzi stadi e secondi stadi per lanciatori di classe intermedia.

Nel settore spazio si sta imponendo l'uso di **micro-nano satelliti**, sia a scopo di validazione in orbita di nuove tecnologie che di osservazione della Terra, sia per scopi civili (monitoraggio eventi catastrofici, confini) che militari (monitoraggio scenari bellici) nonché per funzioni di telecomunicazione *web*. Per questo scopo, lanciatori di piccole dimensioni, facilmente immagazzinabili e trasportabili grazie all'utilizzo dei motori ibridi, riuscirebbero a rendere più efficiente l'operazione di messa in orbita di un *payload* in quanto esso non sarebbe più *subordinato* alla disponibilità di un carico principale a cui associarlo su un lanciatore di medio-grandi dimensioni. Finora infatti il lancio di piccoli satelliti è avvenuto utilizzando lanciatori di grandi dimensioni, in concomitanza con il lancio di altri carichi utili. A titolo di esempio ArianeGroup propone Q@ts – *Quick Access to Space* (accesso veloce allo spazio) – un veicolo a tre stadi con una massa di lancio di 23 tonnellate, che utilizza la propulsione ibrida e usa il perossido di idrogeno come ossidante.

In ambito *Planetary landing* la tecnologia ibrida diventa addirittura abilitante, in quanto è fondamentale le necessità di modulare la spinta con un rapporto 1:10; tale capacità non è ottenibile né con gli attuali motori a propellente liquido né, a maggior ragione, con i motori a propellente solido.

Nel caso dei **motori criogenici a Ossigeno e Metano liquidi**, in Italia uno degli obiettivi fondamentali è quello relativo allo sviluppo del terzo e quarto stadio del VEGA con prestazioni migliori per incrementare le capacità del lanciatore in termini di massa e orbita di rilascio del carico pagante, fino a 2000kg e 700km in Orbita Polare. Attualmente i primi tre stadi sono a propellenti a stato solido mentre l'ultimo a propellenti liquidi; in particolare per quest'ultimo si utilizza la tecnologia Ucraina, che impiega la UDMH (*Unsymmetrical Dimethylhydrazine*, tossico) e il tetrossido di azoto, che permette di raggiungere i 700km (orbita polare) con 1.500kg di carico pagante.

Diversi sono i programmi di sviluppo sul LO_X/LCH_4 (vedi sezione successiva), ma ancora nessun propulsore è stato testato in volo. In questo contesto, per l'Italia è fondamentale accelerare in questa sfida tecnologica al fine di restare al passo dei maggiori competitori internazionali. Riuscire a realizzare e qualificare al volo un quarto stadio LO_X/LCH_4 consentirebbe l'acquisizione di un ulteriore stadio a tecnologia nazionale nel VEGA (il secondo e il terzo sono già prodotti da Avio).

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Propulsione Green

Negli **USA**, Aerojet Rocketdyne del gruppo GenCorp ha sviluppato e portato oramai a TRL (*Technology Readiness Level*) 8 (qualificato per il volo) un propulsore basato sul propellente ecologico AF-M315E sviluppato dallo U.S. *Air Force Research Laboratory* della Edwards Air Force Base in California. L'AF-M315E è un liquido ionico, un composto di sale in forma liquida, il nitrato idrossilammonio (NH_3OHNO_3) che viene utilizzato in qualità di monopropellente.

Aerojet Rocketdyne ha sviluppato un sistema propulsivo completo per la missione GPIM (*Green Propellant Infusion Mission*): composto da 4 motori da 1 Newton di spinta (1N) e uno da 22 Newton (22N).

Il lancio è avvenuto lo scorso 25 Giugno 2019 a bordo del *Falcon Heavy* di SpaceX.

In ***Europa*** la Comunità Europea ha cofinanziato nell'ambito del 7° Programma Quadro (FP7/2007-2013) il progetto **PulCheR** (*Pulsed Chemical Rocket with green high performance propellants*) conclusosi nel 2015, coordinato da SITAEL SpA e altri *partner* europei. PulCheR è un nuovo concetto di propulsore in cui i propellenti sono iniettati nella camera di combustione a bassa pressione e la spinta è generata da impulsi a elevata frequenza. Il concetto è ispirato al meccanismo di difesa di un insetto, il coleottero bombardiere.

Ad ogni impulso, avviene una pressurizzazione dei gas della camera di combustione a causa della decomposizione dei propellenti o delle reazioni di combustione. La pressione finale è molto più alta di quella in cui sono immagazzinati i propellenti.

Il peso del sistema di alimentazione è significativamente ridotto perché i propellenti vengono alimentati a bassa pressione. La pressione di alimentazione diventa indipendente dalla pressione della camera e il degrado delle prestazioni tipico della modalità *blow down* nei propulsori monopropellenti può essere drasticamente ridotto.

Sempre in Europa, nell'ambito del 7° Programma Quadro (FP7/2008-2011) un consorzio di 12 membri di varie nazioni europee guidato dall'Austrian Research Centers GmbH ha dato vita al progetto **GRASP** (*Green Advanced Space Propulsion*) con l'obiettivo di fornire all'industria europea propellenti alternativi per sostituire quelli altamente tossici e cancerogeni attualmente utilizzati (i già citati idrazina, MMH, UDMH, NTO).

Partendo da una selezione di oltre 100 possibili propellenti alternativi, il *team* di GRASP ha proposto una lista di candidati sulla base della valutazione di prestazioni, caratteristiche di tossicità, e TRL. La lista include due monopropellenti (AF-M315E, LMP-103S) e tre combustibili per sistemi bipropellenti (cherosene, trementina, limonene) da abbinare a ossidanti come il perossido di idrogeno (H_2O_2).

Mentre le soluzioni per sostituire l'idrazina sono mature al punto da poter essere utilizzate in volo (TRL 9), la soluzione bipropellente è lontana dall'avere una maturità simile. È necessario concentrare gli sforzi sulla scelta dell'ossidante e sulla relativa iperbolicità con il propellente.

Data la sua relativa instabilità il perossido di idrogeno non può essere considerato al momento applicabile per missioni con una durata superiore a tre anni.

Recentemente, la società Technology for Propulsion and Innovation Srl (T4i), *spin-off* dell'Università di Padova, ha sviluppato un motore monopropellente a perossido di idrogeno **ad alta concen-**

trazione (94%) con una spinta base di 50N e la capacità di essere modulato con un rapporto di 1:5 e un impulso specifico in vuoto di 155s.

Propulsione Ibrida

Negli **Stati Uniti** il ***Mars Ascent Vehicle***, attualmente in fase di sviluppo da parte del Jet Propulsion Laboratory della **NASA**, mira a utilizzare la tecnologia paraffinica per il modulo di ascesa verso il veicolo spaziale in orbita. Inoltre, nell'ambito di un progetto destinato a sviluppare un s*ounding rocket*, NASA Ames Research Center, Stanford University, e Space Propulsion Group hanno realizzato il motore **Peregrine,** che ha passato con successo l'ultimo test al banco il 15 marzo 2017.

In ***Giappone*** la **JAXA** dal 2005 sta sviluppando la tecnologia ibrida, realizzando un motore da 2kN.

In ***Europa*** la Commissione Europea ha finanziato con fondi **Horizon 2020, HYPROGEO**, coordinato da Airbus Defense & Space Toulouse, con l'obiettivo di sviluppare le tecnologie chiave abilitanti per un modulo di propulsione basato sulla propulsione chimica ibrida.

Nell'ambito del programma ESA *Future Launchers Preparatory Programme* (FLPP), Nammo ha sviluppato la tecnologia dei razzi ibridi a mezzo di dimostratori sperimentali a scala reale, sperimentandoli nella base di lancio Norvegese di Andøya.

In ***Italia*** nell'ambito del progetto di ricerca FP7 **SPARTAN**, Thales Alenia Space in Italia con la collaborazione di NAMMO, UNIPD, POLIMI e GMV ha progettato, costruito e validato un simulatore di *lander* per missioni su Marte. Il sistema incorpora un sistema di propulsione ibrida con quattro motori da 1,8kN ciascuno, che funzionano con HTPB e perossido di idrogeno 87,5%.

L'**ASI** ha predisposto un bando di finanziamento con l'obiettivo di innalzare il TRL di motori ibridi con propellente a formulazione di base paraffinica, fino alla realizzazione e *test* a fuoco di un dimostratore in scala rappresentativa per il terzo stadio, nella versione QLV-PPP, di Vega Light.

Nell'ambito del progetto **HYPROB** il CIRA sta sviluppando le tecnologie abilitanti per la propulsione ibrida a base di paraffina attraverso il *design*, il *manufacturing* ed il test di un dimostratore da 1kN. Nel mese di dicembre 2018 sono stati effettuati con successo i primi tiri al banco presso l'aeroporto di Grazzanise (CE), con la collaborazione dell'Università degli Studi Federico II di Napoli. Sono stati eseguiti diversi test compresi alcuni di *throttling* ed è stato raggiunto un impulso totale di 10^4Ns. Il TRL di questo dimostratore è 4 e ci si propone di raggiungere un TRL 5, raddoppiando contestualmente la classe di spinta.

T4i sta sviluppando dal 2014 diverse versioni di un motore ibrido a base di Paraffina/H_2O_2 a alta concentrazione (94%). Diversi modelli da laboratorio sono stati sviluppati e testati fino a 10kN di spinta, con l'obiettivo di sviluppare un propulsore adatto a micro-lanciatori. Inoltre è in fase di sviluppo un modello ingegneristico da 500N. TRL attuale pari a 5/6, obiettivo dichiarato dalla società è consolidare il TRL 6. L'**ASI** ha commissionato ad AVIO il programma **THESEUS** per lo studio di propulsori ibridi alimentati a N_2O e avente come propellente HTPB (*hydroxyl-terminated polybutadiene*) caricato con particelle metalliche (come l'alluminio) oppure combustibili a base di paraffina. Per i test AVIO si è avvalsa dell'impianto presso l'aeroporto militare di Grazzanise (CE), gestito dall'Università Federico II di Napoli. Sono stati testati propellenti alternativi come HDPE e PE (Polietilene e Polietilene ad alta densità).

Propulsione Criogenica: Ossigeno-Metano

A livello Internazionale i programmi che prevedono lo sviluppo di motori a metano sono diversi e coinvolgono tutte le Nazioni impegnate storicamente nella propulsione spaziale. La discontinuità che si rileva rispetto all'ultimo decennio è che i programmi di sviluppo di questi propulsori sono legati a veicoli e missioni ben definiti.

Negli ***Stati Uniti***, sebbene l'esperienza e la conoscenza acquisite sulla propulsione LO_X/LH_2 e LO_X/Kerosene siano estremamente consolidate, ad oggi ci sono diversi studi per la conversione a metano di motori a kerosene esistenti e diversi programmi per la realizzazione di nuovi propulsori.

Space X sta sviluppando i propulsori riutilizzabili **RAPTOR** basati su un ciclo *staged* a LO_X/LCH_4; questi motori sono in fase di sviluppo sia per propulsione *upper stage,* ma se ne sta valutando l'applicabilità anche per primo e secondo stadio e per il velivolo di trasporto interplanetario che è in sviluppo sempre in Space X. Al momento il motore ha dimostrato una durata dello sparo di oltre 100 secondi. È uno dei motori più interessanti poiché ha il rapporto peso potenza più alto rispetto ad altri motori fin qui realizzati. Il motore è attualmente in fase di qualifica.

La **NASA** ha sviluppato un motore da 20kN *pressure feed film cooling* HD per il *lunar lander* **Morpheus**. Al momento è stato testato assieme ad un modulo sperimentale di *lander*.

Blue origin: il motore **BE-4** è un motore di quarta generazione che usa tecniche di *design* e *manufacturing* avanzate. Il suo impiego comprenderà missioni sia commerciali che governative. Utilizza un ciclo *staged combustion*, con propellenti LNG (*Liquefied Natural gas*) e LO_X per produrre una spinta di 2.400kN. LNG può essere utilizzato anche come pressurizzante. Il BE-4 è attualmente in sviluppo e volerà per la fine del 2019 con il ULA Vulcan Rocket. Una variante del BE è il BE-4U che viene utilizzato come *Upper Stage* attraverso l'uso di un ugello più grande e capacità di riaccensione maggiore.

In ***Giappone*** la JAXA ha un importante programma dedicato alla propulsione ossigeno metano ed ha già testato diverse camere di combustione LO_X/LNG per il terzo stadio.

In sviluppo dal 2002 una camera di spinta con camera di combustione ablativa da 100kN (LE-8). Al momento ha accumulato 2.200 secondi di test e un impulso specifico di 315s.

Un'altra camera da 30kN ablativa è stata testata in un impianto con il simulatore di altitudine, dimostrando un impulso specifico di 335s. Visti i risultati non brillanti in termini di impulso specifico è stato sviluppato un motore da 100kN basato sul ciclo "*gas generator*" raffreddato in modo rigenerativo. Questo motore è stato testato a terra per 27 volte accumulando 1.800 secondi di vita utile e un impulso specifico stimato di 356s in vuoto. Le performance non sono ancora considerate sufficienti per un impiego in volo e si sta pensando ad un'ottimizzazione di questo motore anche grazie alla cooperazione con l'ASI.

In ***Europa*** CNES ed Airbus-Safran Launchers stanno lavorando sui propulsori di primo e secondo stadio di nuova generazione, l'obiettivo è la riduzione dei costi di 1/10 e una riusabilità per più di 5 lanci.

Nel 2015 il CNES e Airbus Safran Launchers (ASL) hanno iniziato lo sviluppo di **Prometheus**, un nuovo motore a razzo con più di 1000kN di spinta che porterà tre grosse innovazioni: una forte riduzione dei costi di fabbricazione, riutilizzabilità e nuovi propellenti (LO_X/LCH_4).

AIRBUS sta sviluppando un motore basato sul ciclo "*gas generator*" da 420kN, **ACE-42R**, riutiliz-

zabile e con applicazione elettiva sugli spazioplani di nuova generazione (RD-22). Lo sviluppo è proceduto fino ad ora per test di componenti intermedi prima di arrivare all'integrazione e al test del motore completo. Al momento sono stati testati il generatore di gas e la camera di spinta. La turbina è fornita da IHI.

Il quadro europeo dei principali programmi tecnologici LO_X/LCH_4 è riportato in Figura 15.2.2.

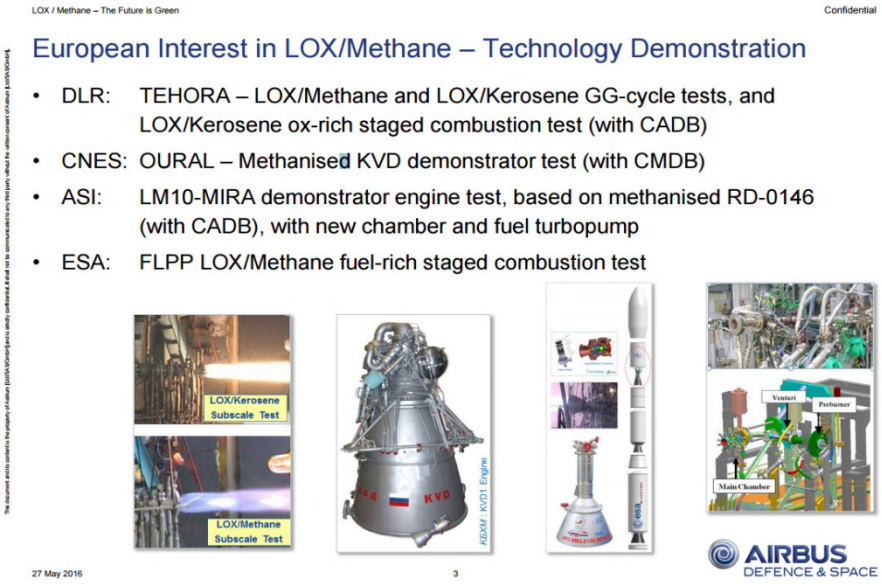


FIG.15.2.2 MOTORI A METANO IN SVILUPPO IN EUROPA (SPACE PROPULSION PROCEEDINGS, 2016).

In ***Italia*** nel programma **HYPROB** (affidato al CIRA) si stanno sviluppando le tecnologie abilitanti per la propulsione LO_X/LCH_4 attraverso il *design*, il *manufacturing* ed il test di alcuni *breadboard* (prototipi) disegnati per lo studio delle fenomenologie di base della propulsione LO_X/LCH_4, così come previsto da finanziamento **MIUR**.

Nel programma **ASI-JAXA** l'Italia (rappresentata dal CIRA ed AVIO) e il Giappone cooperano mettendo a fattor comune le capacità nel campo della R&S legate alla propulsione LO_X/LCH_4, con l'obiettivo di realizzare e testare una **TCA (*thrust chamber assembly*) LO_X/LCH_4 da 10ton**. La camera ha attualmente superato la *Critical Design Review* ed è pronta per la fase di realizzazione, che si completerà entro il 2020.

ASI ed AVIO hanno sviluppato il programma LYRA con l'obiettivo di ampliare le capacità operative del lanciatore VEGA. In ambito propulsivo, in questo programma, in cooperazione con Roskosmos, è stato sviluppato un motore (LM10-MIRA) in cui AVIO in particolare ha sviluppato la piastra di iniezione e la turbopompa. Nel programma di sviluppo VEGA-E, che prevede uno stadio del VEGA basato su un motore LO_X/LCH_4, Avio sta investigando diverse tecnologie per camere di spinta rigenerative; in particolare, a fine 2018 ha testato con successo un motore M10 basato sulla tecnologia di *additive manufacturing* e realizzato in scala presso l'impianto di Colleferro.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

Da quanto emerso nei paragrafi precedenti, vi sono due filoni di particolare interesse che necessitano di un supporto per lo sviluppo:

- propellenti "Green" che possano rimpiazzare le attuali miscele ipergoliche (MMH e NTO), prossime candidate a entrare nell'Annesso XIV del REACH;
- propulsori per lanciatori avanzati, sia a tecnologia ibrida che criogenica

A questo scopo risulta necessario dotarsi di **impianti per i test di grande scala** e impianti di test dedicati a definire quale sia la miscela ipergolica da sviluppare che assicuri le migliori prestazioni e garantisca la facilità e la sicurezza di *handling*.

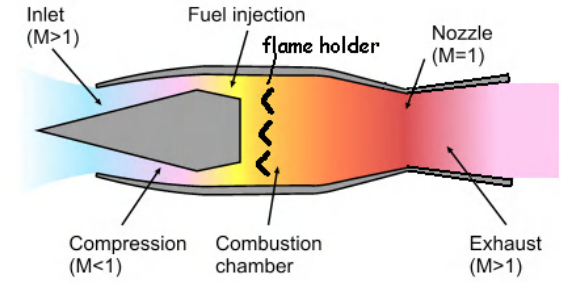
È fondamentale, inoltre, dotare il paese di un **infrastruttura di test di ricerca** su cui investigare su componenti di piccola taglia le fenomenologie relative all'iniezione, alla combustione e allo scambio termico.

Nella propulsione ibrida i test avranno il fine di testare propellenti alternativi a quelli descritti che abbiano velocità di regressione paragonabili ai solidi oltre a diversi tipi di ossidante. Fondamentale risulterà lo studio dei processi fisico-chimici complessi coinvolti nella combustione di motori a propellente ibrido che sono di fondamentale importanza per la previsione e il controllo della prestazione del motore. Di conseguenza, la ricerca su questi temi si rende necessaria per raggiungere una conoscenza più completa di questi fenomeni.

L'investimento complessivo per queste attività è dell'ordine dei 40 M .

15.3 PROPULSIONE RAMJET/SCRAMJET

I propulsori ***Ramjet*** sono i propulsori *air-breathing* più semplici e più efficienti nel regime di volo che spazia da Mach 2.5 a Mach 5.0, nonostante alcune limitazioni quali la condizione di funzionamento a punto fisso e la conseguente necessità di un propulsore aggiuntivo per il raggiungimento della velocità di crociera.



(A)



(B)

FIG.15.3.1 SCHEMA DI FUNZIONAMENTO DI UN RAMJET (A) E MODELLO DI PROPULSORE (B). (FONTE: WWW.QUORA.COM)

Tali propulsori sono caratterizzati da una estrema semplicità costruttiva, vista l'assenza di macchine rotanti, associata ad una elevata efficienza propulsiva nel *range* di numeri di Mach che va da 2.5 a 6÷8, comprendendo così anche gli ***Scramjet***, in cui la combustione avviene in regime *supersonico* (Figura 15.3.2). Tra gli svantaggi di tali sistemi propulsivi occorre evidenziare gli elevati carichi termici per la camera di combustione e l'ugello propulsivo, e i sistemi meccanici di attuazione di parti mobili (per presa d'aria ed ugello), necessari per adattarsi a differenti condizioni di volo. Altri componenti importanti di tali motori sono il sistema di alimentazione combustibile con relative linee fluidiche e serbatoi, il sistema di stabilizzazione della fiamma (*flame-holding*) e il sistema di raffreddamento.

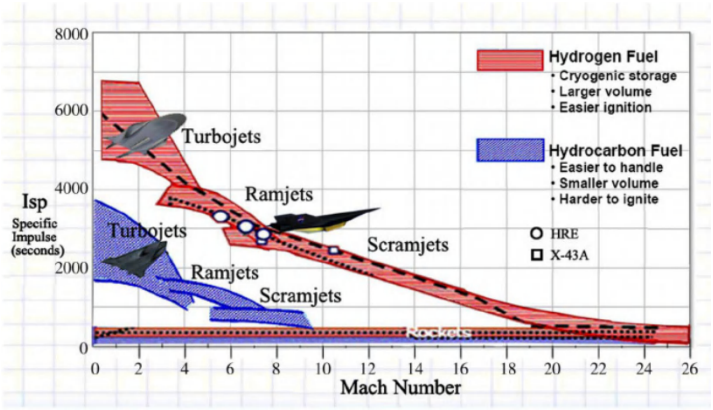


FIG. 15.3.2 IMPULSO SPECIFICO IN FUNZIONE DEL NUMERO DI MACH PER VARI TIPI DI PROPULSORI AEROSPAZIALI (FONTE: WWW.QUORA.COM)

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

L'uso di propulsori *ramjet* risulta essere sfidante sia in campo civile - per l'aviazione commerciale e la messa in orbita LEO di piccoli satelliti - sia in campo militare - per applicazioni missilistiche e per velivoli UAV.

Tra i principali vantaggi assicurati dalla propulsione *ramjet* abbiamo:

- riduzione dei tempi di volo su rotte transoceaniche per applicazioni civili;
- aumento del raggio di azione e riduzione del "time-to-target" per applicazioni militari;
- riduzione del peso del sistema propulsivo rispetto al peso totale per i lanciatori;
- possibilità di sistemi di recupero con velocità supersoniche/ipersoniche.

Tra i possibili utilizzi di un velivolo equipaggiato con sistema propulsivo *ramjet* (come ad esempio il Lockheed D-21 degli anni 60-70) possiamo elencare:

- voli sperimentali ad alta quota e velocità;
- sgancio ad alta quota e velocità di veicoli ipersonici "*small-scale*";
- primo stadio *airbreathing* di un sistema di lancio per la messa in orbita LEO di piccoli satelliti;
- missioni di ricognizione o trasferimento e sgancio di piccoli "*payload*";
- piattaforma di lancio di missili.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

La propulsione *ramjet* è di crescente interesse per applicazioni militari, siano esse le classiche applicazioni missilistiche che gli UAV (*Unmanned Air Vehicles*) per ricognizione o per trasferimento e sgancio di piccoli *payload*. Inoltre, la Comunità Europea negli ultimi quindici anni ha lanciato dei progetti dedicati allo sviluppo di sistemi propulsivi DMR (*Dual Mode Ramjet/Scramjet*), che equipaggiano velivoli da trasporto civile ad elevata velocità (Mach da 5 ad 8) capaci di volare su rotte transoceaniche in poche ore.

Impianti "*direct-connect*" per la propulsione *ramjet* sono disponibili nelle seguenti nazioni:

- **Stati Uniti**: NASA Langley Direct Connect Supersonic Combustion Test Facility, Atlantic

Research Corporation Facilities, Arnold Aerodynamic and Propulsion Test Unit, U.S. Air Force Direct Connect Research Laboratory;

- **Giappone**: Chitose Ramjet Test Facility, Kakuda Space Propulsion Laboratory;
- **Francia**: ONERA S4MA Wind Tunnel.

Non c'è ancora un impianto simile in Italia a supporto dell'industria nazionale.
In **Italia,** nell'ambito di un'attività di interesse industriale relativa alla progettazione, realizzazione e test in volo di un dimostratore di un UAV (di possibile interesse AVIO, MBDA, Aeronautica Militare Italiana), avio-lanciato e poi propulso da un *Solid Rocket Motor* (SRM) come primo stadio e da un propulsore *ramjet* per la crociera, un primo fondamentale passo è ovviamente costituito dalla sperimentazione a terra di tali propulsori *ramjet*, con associato sviluppo di metodologie per la progettazione ed analisi. Come già accennato sopra, è ovviamente necessario avere un'applicazione di volo (di interesse industriale e/o militare) di un tale propulsore *ramjet* che sia ben definita, e che possa fissare i requisiti di prova per i dimostratori e per le condizioni operative.
Quindi, un corretto sviluppo nazionale della tecnologia della Propulsione *ramjet* dovrebbe prevedere i seguenti passi:

- progettazione, realizzazione e collaudo di un impianto di prova per simulazioni a terra di dimostratori di propulsori *ramjet* in modalità "*direct-connect*", ovvero senza la sezione della presa d'aria;
- progettazione, realizzazione e test di dimostratori di propulsori *ramjet* a complessità crescente, per l'esecuzione di campagne di prova per la verifica a terra del funzionamento e delle prestazioni.

Il livello di TRL che si raggiungerebbe con tale sperimentazione a terra è 5, ovvero da classificazione NASA: "*Component and/or breadboard validation in relevant environment*", e questo è dovuto al fatto che nei dimostratori del sistema propulsivo manca la presa d'aria e che il motore scarica in atmosfera (ugello adattato alla pressione ambiente), senza alcuna camera a vuoto che simuli l'effetto della quota (ASD, *Altitude Simulation Device*).
Il CIRA ha preliminarmente definito un impianto di prova per la propulsione *ramjet*, individuandone le caratteristiche e prestazioni principali riportate nella tabella seguente.

TEMPO DI PROVA	**MAX. 30 S**
PORTATA D'ARIA	**3.5÷7 KG/S**
P_{CAMERA}	**10 BAR**
T_{CAMERA}	**2300 K**
SPINTA	**6÷11 KN**
LUNGHEZZA ARTICOLO DI PROVA	**1.15 M**
DIAMETRO ARTICOLO DI PROVA	**0.12 M**

TAB. 15.3.1 CARATTERISTICHE E PRESTAZIONI PRINCIPALI PER TEST DI PROPULSORE RAMJET (CREDIT CIRA)

Un siffatto impianto permetterebbe di investigare le problematiche di base connesse ai propulsori *ramjet*, con modelli "*direct-connect*" di complessità crescente (come numero di iniettori e stabi-

lizzatori di fiamma), definendo delle leggi di scala sugli effetti dell'aria viziata, sul ritardo di accensione, sui gas incombusti, sulla stabilità di fiamma, nonché di misurare le prestazioni in termini di spinta, impulso specifico ed efficienza di combustione. Inoltre, sarebbe possibile fare degli studi di *trade-off* sul tipo di combustibile (kerosene, metano gassoso) e sulla variazione di "*equivalence ratio*" (ER), sulla velocità di volo (Mach da 2.5 a 5 tramite la variazione della temperatura totale), sulla configurazione degli stabilizzatori di fiamma e dell'ugello propulsivo.
La durata stimata di una campagna di prova di accettazione/taratura di tale impianto (18 test con dimostratore semplificato) è di quattro mesi, e prevede l'utilizzo di sei addetti (tra ricercatori e tecnici) e il costo di 50k di consumabili. La durata stimata di una campagna di prova di ricerca (80 *test* con dimostratore evoluto) è di dieci mesi con 250k di costi.
Una volta poi raggiunto TRL 5 per la tecnologia della propulsione *ramjet*, possibili successivi sviluppi per incrementare il livello di TRL nazionale potrebbero essere:

- progetto, realizzazione e test di volo di un veicolo semplificato e propulso con un SRM che consenta una prova in volo del propulsore *ramjet* completo ma non funzionante (per verificare il funzionamento della presa d'aria) → TRL=6 ("*System/subsystem model or prototype demonstration in a relevant environement (ground or space)*");
- progettazione, realizzazione e test in volo di un dimostratore UAV dotato di un propulsore *ramjet* come secondo stadio propulsivo funzionante e di un primo stadio propulsivo costituito da un SRM (vedere l'esempio di Figura 15.3.3) → TRL=7 ("*System prototype demonstration in a space environment*").

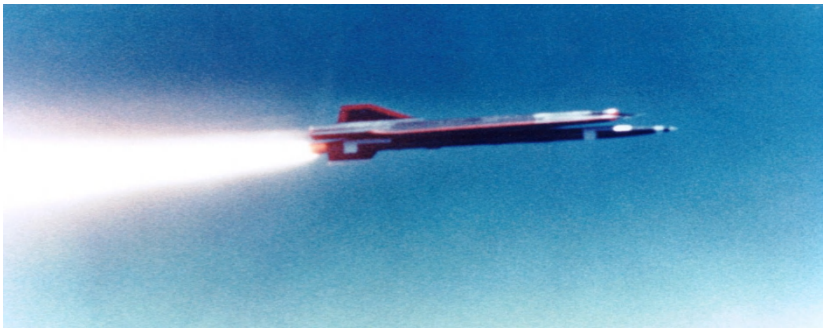


FIG. 15.3.3. RECONNAISSANCE DRONE LOCKHEED D-21B AVIO-LANCIATO DA UN B-52 E ACCELERATO DA UN SRM ALLE CONDIZIONI OPERATIVE DEL PROPULSORE RAMJET (DA HTTPS://EN.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/LOCKHEED_D-21#/MEDIA/)

Passi questi ultimi che richiedono necessariamente una forte sinergia dal punto di vista tecnologico, realizzativo, organizzativo e logistico con *partner* industriali e istituzionali (Aeronautica Militare Italiana).
L'impianto proposto dal CIRA a supporto dell'industria nazionale per la sperimentazione a terra di propulsori *ramjet* sfrutterebbe la sinergia con il progetto HYPROB, co-finanziato dal MIUR, che prevede la realizzazione di un *test-bed* (H-IMP) per la propulsione a razzo a propellenti liquidi (LOx/CH_4) e ibridi (N_2O/Wax), oltre alle capacità di progettazione ed analisi maturate dal CIRA nell'am-

bito della partecipazione a progetti europei (LAPCAT-I/II, HEXAFLY, STRATOFLY) e nazionali (HYTAM) dedicati alla propulsione *air-breathing*.

L'idea è quella di condividere con l'impianto H-IMP le linee di alimentazione dell'ossigeno (pre-camera di miscelamento) e del metano (nel caso di *ramjet* aria/metano), le opere civili, il sistema di automazione e quello di sicurezza, la diagnostica e il sistema di acquisizione dati, e di utilizzare l'impianto centralizzato di aria compressa disponibile al CIRA. Alcuni componenti sarebbero invece da realizzare ex-novo, come ad esempio serbatoio e linea di combustibile (nel caso di *ramjet* aria/kerosene), pre-camera di miscelamento con ossigeno, riscaldatore (*air-heater*) e banco di prova.

L'obiettivo strategico generale che si intende perseguire, rendendo disponibile un tale impianto di ricerca, è quello di incrementare le competenze e le capacità tecnologiche e di prova a livello nazionale nella realizzazione di propulsori *ramjet* per applicazioni duali, da mettere a disposizione anche per progetti di ricerca dedicati alla propulsione *air-breathing* in ambito nazionale, europeo e internazionale.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

Sono state fatte le seguenti stime delle risorse economiche necessarie per raggiungere il target di TRL 5 in Italia per quanto riguarda la tecnologia della propulsione *ramjet*:

- 3.8 milioni di euro per progettazione e realizzazione dell'impianto per propulsione ramjet, compresi componenti aggiuntivi, diagnostica, sistema di acquisizione dati, due dimostratori per test accettazione impianto e per campagne di test finalizzate alla verifica del funzionamento e delle prestazioni;
- 4.5 anni per avere l'impianto funzionante con matrice test di accettazione eseguita.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 16

SVILUPPO NUOVI PROPELLENTI SOLIDI

Le frontiere di sviluppo per nuove classi di propellenti solidi sono legate alla riduzione degli impatti ambientali, mantenendo prestazioni sufficienti attraverso la identificazione e industrializzazione di nuove molecole energetiche.
Per quanto riguarda il miglioramento degli impatti ambientali, le tecnologie critiche identificate sono:

- **Ossidanti verdi**: il miglioramento in termini di impatto ambientale riguarda la ricerca di propellenti che riducano le emissioni di specie tossiche e corrosive come l'acido cloridrico, conseguenza della reazione del perclorato d'ammonio. Ad esempio i propellenti:
  - contenenti nitrato di ammonio (AN);
  - con ossidanti verdi ad alta energia (es. ADN, FOX-*7*, RDX..);
  - "*scavenged*", con nitrato di sodio (NaNO3), con riduzione delle emissioni acide dal 20 fino all'80%;
  - "*neutralized*", con magnesio (Mg), con riduzione delle emissioni acide fino al 40%.
- Dispositivi di abbattimento (**scrubber**): messa a punto di sistemi di abbattimento delle emissioni dei getti dei motori provati a terra.

Gli elementi tecnologici prioritari relativi al miglioramento delle prestazioni dei propellenti a solido, per compensarne le perdite legate all'uso ridotto di composti con Cloro sono:

- propellenti con leganti energetici (GAP e POLYNIMMO);
- sviluppo di *Bonding Agent* avanzati: Ossazoline e derivati ossazolinici, isocianurati trisostituiti (THEIC)

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Il principio del propellente composito è basato sulla necessità di avere una reazione di combustione auto sostenuta nella camera di combustione per generare il flusso di gas attraverso l'ugello e conseguentemente ottenere la spinta. La reazione di combustione avviene tra un ossidante e un riducente (combustibile), entrambi presenti in stretto contatto all'interno di una matrice solida.
Come legante è usualmente impiegata una gomma poliuretanica. Il polimero base è il polibutadiene ad ossidrili terminali (HTPB), liquido allo stato di materia prima, cui vengono aggiunte, per mescolamento, le cariche solide. Durante la fabbricazione vengono, inoltre, addizionati isocianati che per reazione di polimerizzazione porteranno alla struttura poliuretanica. Questo processo è generalmente definito "*curing*": il propellente passa, quindi, da una fase liquida viscosa, in cui l'ossidante e il combustibile sono in sospensione, ad una in cui si ottiene una gomma composita solida, in cui le particelle solide sono intrappolate nel reticolo della struttura poliuretanica. Il

legante usualmente include anche agenti che migliorano la coesione dell'interfaccia polimero-cariche. Essi sono necessari per le diverse caratteristiche di polarità delle due specie, che altrimenti tendono a non aggregarsi in maniera naturale. Altri additivi sono rappresentati dai plastificanti, in grado di migliorare la lavorabilità e le caratteristiche meccaniche finali. Il legante è responsabile del comportamento meccanico del propellente e dell'incollaggio all'involucro motore (o agli isolanti termici). Inoltre è esso stesso un tipo di combustibile per la possibilità di generare una combustione.

Come combustibile principale è usualmente impiegata la polvere di alluminio (Al), per dare la reazione di combustione prevalente.

L'ossidante più utilizzato per propellenti solidi compositi è il perclorato di ammonio (AP).

La coppia di ossido-riduzione (redox) AP/Al è in realtà una combinazione molto energetica ed è la prima responsabile dell'alta spinta fornita dai propellenti compositi.

La velocità di combustione del propellente così ottenuto è influenzata dalla distribuzione delle particelle di AP per la differente superficie di combustione presentata da cristalli di differente grandezza. La reazione dell'AP, infatti, avviene allo stato solido, essendo una decomposizione indotta da stress termico (accensione) che fornisce ossigeno per la combustione dell'alluminio.

La caratteristica di combustione del propellente dipende generalmente da alcuni altri parametri quali la pressione nella camera, determinata dall'area di gola dell'ugello per la compressione dei gas e la temperatura raggiunta. Tutti questi parametri sono dunque presi in considerazione, quando si progetta un grano propellente per un motore destinato ad una specifica missione. Ogni sotto-componente deve essere finalizzato per poter raggiungere il requisito di spinta del motore.

La forma del grano (a stella, a sigaretta, ecc...) influisce sul profilo di spinta così come la configurazione dell'ugello e il suo rapporto di espansione.

La maturità della tecnologia di propulsione a composito solido permette ora una buona flessibilità nelle caratteristiche generali, insieme ad alti livelli di affidabilità e ridotti costi di produzione.

Il propellente composito è classificato come esplosivo e mostra sensibilità a sollecitazioni esterne con la possibilità di reazione. Prove di sicurezza assegnano ai propellenti compositi la classe di rischio ONU 1.3.C che identifica la possibile reazione come "combustione" invece di "detonazione".

Il perclorato di ammonio ha eccellenti caratteristiche come ossidante nei propellenti solidi, in termini di prestazioni energetiche, compatibilità, insensibilità e processabilità: pur non essendo tossico, può avere impatti ambientali non secondari a causa dei composti di Cloro nelle emissioni.

Nel futuro, regolamenti REACH potrebbero limitare l'impiego di materiali largamente impiegati in questa tecnologia.

Per rendere sostenibile il futuro dei propellenti solidi è necessario, quindi, investigare su materiali innovativi, prodotti con tecnologie "*green*", che permettano di raggiungere caratteristiche di minimo impatto ambientale assicurando nel contempo prestazioni energetiche e livello di insensibilità comparabili agli attuali propellenti.

La riduzione del perclorato di ammonio nelle formulazioni di propellente composito, ne limita il contenuto energetico sia in termini di impulso specifico che volumetrico. Le formulazioni *green* (ad es. a basso impatto ambientale) tendono a perdere di interesse per applicazioni ad alte pre-

stazioni come i propulsori spaziali. Il recupero dell'energia persa potrebbe essere risolto con l'impiego di leganti polimerici energetici al posto del legante inerte HTPB.
Per rendere sostenibile il futuro dei propellenti solidi è necessario, quindi, investigare su materiali innovativi, prodotti con tecnologie "*green*", che riducano l'impatto ambientale assicurando però delle prestazioni energetiche e di sicurezza comparabili alle generazioni attuali di propellenti.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Negli Stati Uniti, in Cina, in Russia ed in alcuni stati Europei (Francia, Svezia) le attività di ricerca sono rivolte ad ossidanti alternativi al perclorato di ammonio, oltre allo sviluppo di nuovi leganti energetici. Allo stato, poco o nulla esiste su formulazioni già industrializzate contenenti i materiali suddetti.
Da diversi anni sono in corso in Italia attività di ricerca mirate al miglioramento della tecnologia in termini di riduzione delle emissioni acide (i cosiddetti "*clean propellants*", propellenti puliti) e sono state studiate nuove famiglie di propellente facenti uso di materiali energetici, in accordo con le tendenze della comunità scientifica mondiale.
AVIO a partire dal 2012 ha partecipato ai progetti di ricerca e sviluppo HISP (2012-2014), *High performance solid propellants for In-Space Propulsion, or solid propellant with High Isp (specific impulse)* e GRAIL (2014-2017), entrambi finanziati dalla Comunità Europea nell'ambito del programma Horizon 2020, cui hanno partecipato diverse altre realtà industriali e centri di ricerca e università europei.
Inoltre l'industria (Avio S.p.A.) e i centri di ricerca (in particolare il Politecnico di Milano) studiano attualmente propellenti ad alte prestazioni con formulazioni a base di ADN al 40%, AP, Alluminio e HTPB, che tuttavia risulta più sensibile e ha classificazione ONU 1.1D; nell'ambito dei propellenti verdi sono in corso studi su formulazioni a base di nitrato di Ammonio, HTPB e RDX oppure FOX-7 (una molecola simile energeticamente all' RDX ma di questo meno sensibile), e su soluzioni industriali che prevedano il legante energetico GAP.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

L'orizzonte di sviluppo di propellenti verdi avanzati richiede investimenti significativi non solo nelle attività di identificazione delle molecole adatte, ma soprattutto nell'industrializzazione dei processi di sintesi (si tratta di materiali energetici), di flemmatizzazione, di logistica.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 17

TECNOLOGIE PER L'ACCESSO ALLO SPAZIO

I ricavi globali nel settore della *Space Economy* sono cresciuti da $175 miliardi nel 2005 a circa $ 385 miliardi nel 2017, con una crescita di circa il 7% all'anno, nonostante la crisi.
Il valore del settore nei prossimi 15 anni supererà il trilione di dollari secondo Morgan Stanley e i 3 trilioni secondo Merril Lynch.
Nel 2017 i ricavi nella filiera dell'accesso allo spazio hanno rappresentato meno del 2% del settore spazio. Sebbene si tratti di una frazione limitata del mercato, questo comparto è completamente abilitante per la *Space Economy*: da qui le forte spinte competitive globali che interessano il settore dei lanci.
L'indipendenza per l'accesso allo spazio passa necessariamente attraverso il posizionamento competitivo delle imprese e dei prodotti nazionali ed europei nel mercato globale dei servizi di lancio. La sola domanda istituzionale europea, infatti, non assicura la sostenibilità della filiera industriale ed infrastrutturale né in termini economici né di perennità delle competenze.
Lo scenario globale per il settore dei lanci prevede forti rischi per la competitività della filiera europea e nazionale, a causa diversi fattori:

- la dimensione del mercato istituzionale, prevalentemente *captive* (vedi *Buy American Act*), è marginale in Europa rispetto agli Stati Uniti, la Cina, la Russia: questo consente a molti competitori internazionali di godere di una cadenza di lancio elevata, con gli evidenti benefici in termini di economie di scala e scelta di tecnologia (ad esempio il recupero degli stadi);
- livelli diversi di regolamentazione per lanci da diversi paesi: ad esempio i veicoli di lancio indiani utilizzano ampiamente componenti a base di amianto, non rispettano i dettami delle politiche sui detriti spaziali; le regolamentazioni per il sorvolo di terre emerse previste dalle autorità russe o cinesi sono meno stringenti di quelle europee, così come, più in generale le discipline per la sicurezza;
- la disponibilità di infrastrutture industriali, di lancio e test, spesso favorite dalla disponibilità di grandi aree, i cui investimenti sono derivati dalla visione strategica delle grandi potenze nucleari.

La spinta competitiva è dimostrata dalla straordinaria crescita degli investimenti su scala globale nel settore dell'accesso allo spazio, ben evidenziata dai dati sullo sviluppo di nuovi sistemi di lancio che rivoluzioneranno nei prossimi anni il mercato dei lanci (Figura 17.1). La brusca accelerazione in questo ambito è alimentata da nuove tecnologie (ad es. le strutture principali in composito, i nuovi sistemi propulsivi a basso costo, l'avionica basata su componentistica non *space grade*, ecc.), da nuove architetture di sistema (ad es. configurazione bistadio (TSTO), primo stadio riutilizzabile, ecc.), da nuovi modelli di *business*, da nuove taglie dei lanciatori: molto pesanti, con

capacità di carico utile tra le 35 e i 130 ton in orbita bassa, molto leggeri o micro, con prestazioni tra i 100 e i 350kg.
Un riflesso della spinta competitiva è la riduzione del costo di lancio specifico (es. $ per kg di carico utile in LEO) che negli ultimi 10 anni si è ridotta di un fattore 15, raggiungendo valori inferiori ai 3.500$/kg per i lanci più grandi.
I nuovi grandi sistemi di lancio rendono concretamente possibili missioni di esplorazione del sistema solare, lo sviluppo delle stazioni cis-lunari, lo schieramento economico di grandi costellazioni di satelliti in orbita terrestre. I micro sistemi rendono possibili missioni speciali non coperte dalle rotte battute commercialmente, o per le quali lo schieramento veloce è un fattore critico.

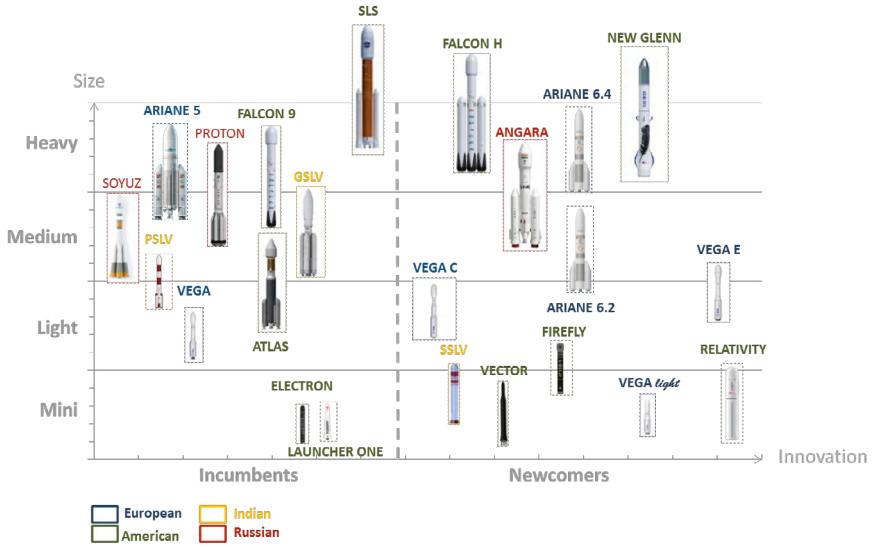


FIG. 17.1 ACCESSO ALLO SPAZIO: GLI ATTORI PRINCIPALI (CREDIT AVIO)

Per mantenere un ruolo significativo per l'accesso allo spazio e il trasporto spaziale, il paese deve identificare un ambito e perseguirne gli obiettivi abilitanti al fine di costituire una *leadership* anche nel mercato commerciale globale.
La visione sviluppata dal sistema paese è la specializzazione nel lancio e nel trasporto spaziale di satelliti di classe medio-piccola indirizzati prevalentemente alle orbite terrestri basse e nel contributo significativo ai sistemi di trasporto spaziale europeo per i grandi carichi utili. Tale visione è completamente coerente all'evoluzione dei bisogni del mercato che prevede nel prossimo decennio un aumento significativo dei micro e mini satelliti in LEO e una sostanziale stabilità dei bisogni per i grandi satelliti in orbite diverse.
Chiave per la competitività è il costo del servizio di lancio, l'affidabilità e la versatilità dell'offerta. Quest'ultima si riassume nella capacità di operare qualsiasi missione, di accoppiare senza vincoli più satelliti nel corso del medesimo volo e di fornire servizi al *payload* più avanzati rispetto a quel-

li dei concorrenti (ad es. accuratezza orbitale, possibilità di cambi di anomalia e di piano orbitale, schieramento di costellazioni, possibilità di deorbitazione o rientro a terra, ecc .).

IL PERCORSO DI SVILUPPO DEI SISTEMI DI LANCIO DELLA FAMIGLIA VEGA

Nella figura 17.2, per continuità, è riportato lo schema del percorso di sviluppo della famiglia Vega nel breve e medio periodo. Le principali sfide tecnologiche sono legate da un lato alla riduzione del costo specifico di lancio (a 12.000$/kg di carico utile in LEO per questa classe di satelliti) e all'estensione della versatilità e dei servizi al carico utile.

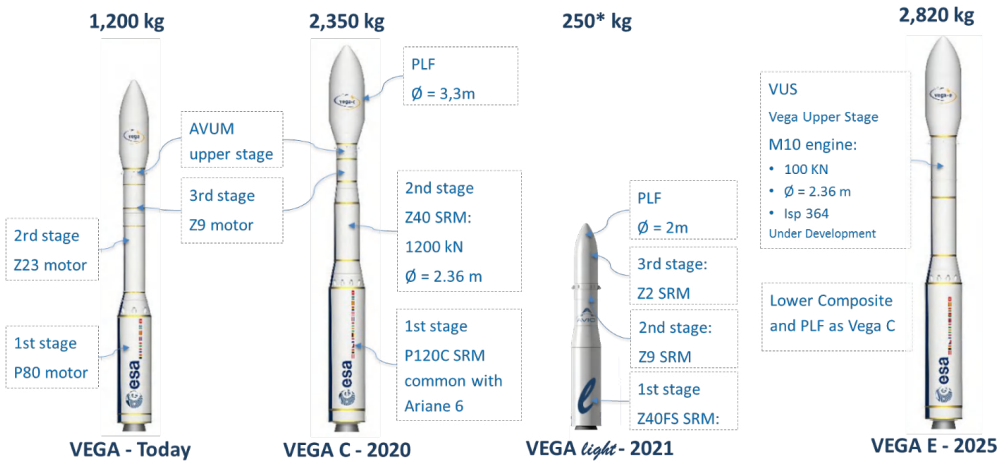


FIG. 17.2 L'EVOLUZIONE DEI PICCOLI LANCIATORI EUROPEI (CREDIT AVIO)

17.1 TECNOLOGIE PER VEICOLI DI LANCIO PARZIALMENTE RIUTILIZZABILI

Le tecnologie cardine per lo sviluppo di sistemi di lancio parzialmente riutilizzabili abbracciano ambiti diversi: la meccanica del volo e gli ambienti, in particolare in fase di rientro, le logiche di Guida Navigazione e Controllo, i sistemi propulsivi, i processi logistici con particolare attenzione al ricondizionamento, la manutenzione, il collaudo, il monitoraggio dello stato di operatività di componenti e strutture. Inoltre, le scelte di architettura del sistema sono critiche per il successo: nonostante il successo dell'approccio Space X, non è provato che la formula *Vertical Lift off Vertical Landing* sia ottima per tutte le applicazioni. Le tecnologie prioritarie identificate riguardano i seguenti ambiti:

- **architetture di veicoli riutilizzabili.** In particolare, per massimizzare gli indici di riuso, i veicoli devono avere una grande parte della distribuzione del valore sul primo stadio, con configurazioni del tipo bistadio. Inoltre, in funzione del modello economico europeo, la strategia di rientro e atterraggio ottimo deve essere verificata accuratamente, confrontando le opzioni di rientro sulla base di lancio (efficace dal punto di vista logistico ma penalizzante in termini di prestazioni) o su piattaforme remote, l'atterraggio verticale, orizzontale o il recupero in mare, il sistema propulsivo ad alta capacità di parzializzazione o con motori di atterraggio a punto fisso, sistemi di controllo di assetto, *harness* di atterraggio, ecc.;
- **ottimizzazione dell'analisi di missione**;
- sistemi e strategie di **Guida e Navigazione** per la fase di rientro e atterraggio;
- sistemi di **controllo termico** attivo e passivo per le fasi di rientro;
- estensione del regime di funzionamento dei **sistemi propulsivi** di atterraggio a condizioni di accelerazione negativa;
- estensione dei requisiti di ***lifing*** nei componenti a vita limitata (camere di combustione, turbomacchine, scudi termici, tenute criogeniche, ecc.);
- strategie di **manutenzione, riparazione** e **collaudo** e *health monitoring*;
- tecnologie del Sistema di Terra (ad es. monitoraggio e sicurezza del volo nella fase di rientro).



FIG. 17.1.1 PRIMO STADIO RIUTILIZZABILE (CREDIT AVIO)

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

I modelli economici dei servizi di lancio mostrano che, sotto alcune condizioni, il riutilizzo parziale del composito inferiore fornisce un beneficio sul costo di lancio specifico. Le migliori stime indipendenti mostrano che con un numero di riutilizzi superiore a 5 e con un numero di lanci per anno superiore a 20, il costo di lancio specifico per il riferimento industriale (ad es. il lanciatore *Falcon Heavy*) si riduce del 20%.

Ad oggi, il modello di *business*, applicato al mercato accessibile alle imprese europee non assicura alcun vantaggio legato alla riutilizzabilità: questo è dovuto, in massima parte, alla cadenza di volo limitata, alla taglia dei veicoli di lancio (Vega e Ariane) e naturalmente alla limitata maturità tecnologica disponibile. Inoltre, a causa della configurazione per il 95% a solido, il Vega, nella sua classe, è in ogni caso un'alternativa affidabile ad architetture riutilizzabili.

Ciononostante, lo sviluppo e la maturazione delle tecnologie abilitanti per la realizzazione di veicoli di lancio parzialmente riutilizzabili ha rilevanza nella preparazione delle famiglie di veicoli di lancio che entreranno in servizio negli anni 30, periodo nel quale la dimensione attesa del mercato renderà l'architettura parzialmente riutilizzabile certamente vantaggiosa anche in ambito europeo.

17.2 TECNOLOGIE PER PICCOLI VEICOLI DI LANCIO

Lo sviluppo di mini e micro lanciatori è una tendenza mondiale ben osservabile per le applicazioni di accesso allo spazio. Le esperienze e gli studi disponibili dimostrano come sia non conveniente (e talora impossibile) realizzare un piccolo veicolo di lancio scalandone uno più grande. È necessario sviluppare tecnologie abilitanti per permettere il raggiungimento di prestazioni accettabili (ad es. attraverso frazioni in massa estreme) nel rispetto di regolamentazioni che non differenziano la classe del veicolo e di vincolo logistici derivanti da fattori economici.
Le sfide tecnologiche da superare sono legate all'ottimizzazione dei costi del servizio di lancio e al modello operativo. In particolare:

- riduzione numero di parti, attraverso integrazione funzionale sulle strutture;
- strutture "*full carbon*" senza componenti metallici di interfaccia;
- sistemi di propulsione ausiliaria e controllo di assetto basata su propellenti verdi;
- sistemi avionici modulari ad architettura distribuita e basati su componenti non di grado spazio;
- sistemi di separazione a basso costo e a basso shock;
- sistemi di *Safe&Arm* e comandi per attuatori pirotecnici elettrici o digitali;
- sistemi autonomi di bordo di terminazione del volo;
- sistemi automatici di integrazione meccanica, fluidica ed elettrica sul sito di lancio;
- sistemi di comando e controllo, tracciamento e telemetria portatili.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

La tendenza alla riduzione della taglia dei satelliti, grazie anche alla miniaturizzazione delle componenti avioniche, dei *payload* e dei sistemi propulsivi si concilia con l'offerta di veicoli di lancio di prestazioni sempre maggiori, attraverso l'incremento di versatilità di questi ultimi, cioè la capacità di trasportare aggregati di numerosi satelliti nell'ambito della stessa missione e di schierarli nelle rispettive orbite attraverso manovre orbitali. Tuttavia cambi di inclinazione del piano orbitale di più di pochi gradi (per Vega E circa 15°) o del tempo locale al nodo ascensionale sono molto costosi dal punto di vista energetico. Perciò gli aggregati di satelliti che possono essere schierati nel corso di una singola missione devono avere come obiettivo condizioni orbitali ragionevolmente prossime.
Per questo esiste un mercato, complementare a quello delineato in precedenza, per piccole missioni fuori dalle "rotte" più battute (come le eliosincrone) o con requisiti di tempestività allo schieramento irraggiungibili attraverso un aggregato di satelliti non omogeneo.
Questo mercato può essere coperto da generazioni di micro e mini lanciatori, con costi del servizio di lancio limitati in valore assoluto (ad esempio tra i 5 e i 15M$) e costi specifici di lancio

nell'ordine di 40.000$/kg.
In Italia è previsto lo sviluppo di un veicolo di piccola taglia, il Vega *light*, il cui primo volo è previsto alla fine del 2021. La concezione del veicolo è indipendente dalla selezione della base di lancio e il relativo segmento di terra è adattabile a lancio da basi fisse o mobili (ad es. piattaforme navali).

17.3 TECNOLOGIE PER L'ESTENSIONE DEI SERVIZI AI CARICHI UTILI

L'aumento di versatilità dei sistemi di accesso allo spazio è una implicazione dello sviluppo delle applicazioni della *Space Economy*: essa avrà una rilevanza sempre maggiore nel prossimo decennio. La versatilità è la capacità per un sistema di lancio di schierare carichi utili in diverse condizioni orbitali, anche nell'ambito della stessa missione, fornendo uno spettro di servizi più ampio ai passeggeri.
La versatilità richiede la disponibilità di tecnologie e moduli il cui sviluppo, anche su base incrementale, è prioritario:

- **propulsione orbitale** ad alte prestazioni e **ri-accendibile**: capacità del veicolo di rilasciare carichi utili diversi in condizioni orbitali sensibilmente diverse nel corso della stessa missione;
- **adattatori e *dispenser*** per il rilascio di aggregati qualsiasi di satelliti;



FIG. 17.3.1 ADATTATORI E DISPENSER VERSATILI PER CARICHI UTILI (CREDIT AVIO)

- moduli di **estensione** della vita **orbitale**, ottimizzati anche per attività di *In-Orbit Testing, In-Orbit Validation, In-Orbit Servicing* con servizi estesi ai carichi utili (potenza elettrica, telemetria, navigazione, controllo di assetto, gestione del volo, ecc.) e lunga permanenza orbitale;

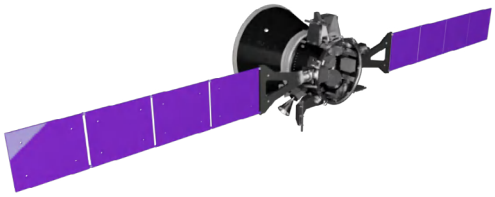


FIG. 17.3.2 MODULO ESTENSIONE DELLA VITA ORBITALE (CREDIT AVIO)

- moduli propulsivi addizionali per missioni che richiedano lunghe manovre di trasferimento orbitale, a base di propulsione elettrica o chimica.

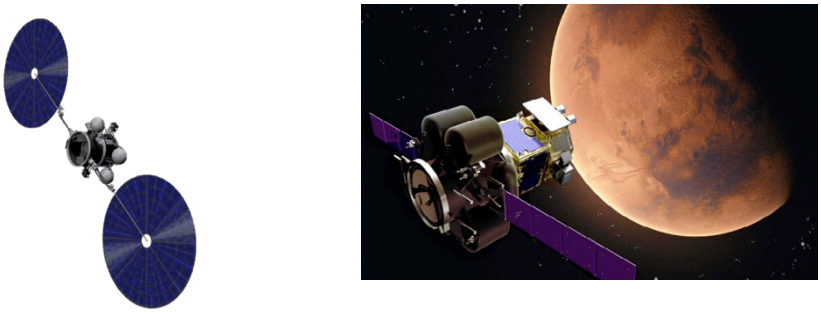


FIG. 17.3.3 MODULI PROPULSIVI AUSILIARI (CREDIT AVIO)

- moduli di rientro riutilizzabili per operazioni di *download* di carichi utili dall'orbita bassa a pista aeroportuale.

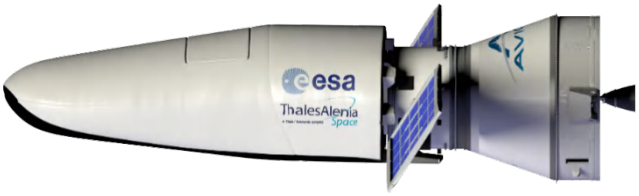


FIG. 17.3.4 SPACE RIDER (CREDIT AVIO)

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Il miglioramento della versatilità dei sistemi di lancio è una delle leve per mantenere un livello di competitività coerente con la sostenibilità dell'accesso indipendente allo Spazio in Europa. L'aumento di versatilità permette di programmare missioni con elevati coefficienti di riempimento dei veicoli di lancio nei voli con aggregati di carichi utili, incidendo sul costo effettivo e sulla tempestività del servizio di lancio. Versatilità si declina in diversi requisiti: capacità di alloggiare e rilasciare in orbita combinazioni diverse di carichi utili (dal singolo, ai *piggy-back* al *rideshare*), capacità di effettuare un elevato numero di manovre orbitali comandate o programmate, inclusi cambi di piano significativi, capacità per lunga permanenza orbitale anche per consentire cambi di anomalia o di ora locale al nodo ascendente con manovre a bassa energia, servizi estesi al carico utile, capacità di deorbitazione o di *download*.

17.4 TECNOLOGIE PER IL LANCIO DA PIATTAFORMA MOBILE

Motivazioni di natura strategica più che economica spingono paesi che non dispongano di un poligono di lancio fisso allo sviluppo di sistemi di lancio basati su piattaforme mobili. L'orientamento dei requisiti di alto livello, spesso sostenuti da esigenze dell'amministrazione difesa, identifica piattaforme galleggianti o aeroportate come la soluzione operativa preferita.
Le tecnologie abilitanti da sviluppare nei due casi:

- **piattaforma Galleggiante**, il veicolo di lancio è un derivato diretto dalle versioni da piattaforma fissa (ad esempio un Vega *light*):
  - sistemi autonomi di bordo per la terminazione del volo;
  - sistemi automatici di integrazione meccanica, fluidica ed elettrica sulla piattaforma di lancio;
  - sistemi di comando e controllo, tracciamento e telemetria portatili.
- **piattaforma Aeroportata**, il veicolo di lancio è un lontano derivato delle versioni da piattaforma fissa e ha una configurazione ritagliata attorno all'aeromobile vettore. Si distinguono tre casi come esplicitato nella tabella 17.4.1

				Tecnologia abilitante C= Critico; N= Non Critico							
Aeromobile Vettore	**Esempio**	**Massa lanciatore al decollo**	**Prestazioni in LEO**	Superfici Aerodinamiche	Paracadute di Estrazione	Slitta Subalare/di Estrazione	Dispositivi di aggancio	Meccanica del volo in fase di rilascio	Configurazione bistadio ad alto impulso specifico	Tracciamento, Telemetria	Sistemi autonomi di bordo per la terminazione del volo
Carrier grande con rilascio subalare	B747, Strato Launcher	50-200ton	300-2000kg	C		N	C	N		N	N
Carrier medio con estrazione posteriore da cargo-bay	A400, C130J	18ton	50-120kg	C	C	C	N	C		N	N
Carrier piccolo	EFA, Rafal	1-5ton	0-20kg	C		N	C	N	C	N	N

TAB. 17.4.1 CASI DI PIATTAFORMA AEROPORTATA (CREDIT AVIO)

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Integrata nel sistema europeo di accesso allo Spazio, la capacità di lanciare dal territorio nazionale è un valore strategico. Tuttavia, considerata la localizzazione geografica del nostro Paese (ad es. nel cuore del Mar Mediterraneo), quest'obiettivo non è di semplice realizzazione: infatti qualsiasi traiettoria di ascesa di un veicolo di lancio che decolli dal suolo nazionale, implica il sorvolo in condizioni sub-orbitali di aree densamente popolate, risultando non compatibile con le massime

probabilità di danno catastrofico per le popolazioni (*casualty risk limit*) oggi fissato dalle normative internazionali.

L'industria e l'ASI, hanno svolto diverse analisi volte a superare i problemi relativi alla sicurezza delle operazioni di ascesa in orbita, valutando in particolare l'utilizzo di una base fissa posta in acque extraterritoriali (ad es. Malindi oggi, tuttavia, nella sovranità del Kenya) e l'uso di una piattaforma mobile, galleggiante o aviotrasportata. Le due ultime possibilità sono entrambe tecnicamente fattibili sebbene con domini di prestazioni diversi. La missione tipica prevede l'imbarco del veicolo di lancio sulla piattaforma, il trasferimento in un'area geograficamente atta alle operazioni di lancio per l'inclinazione richiesta (prevalentemente nell'Oceano Atlantico per veicoli a due o tre stadi, con qualche opportunità nel Mediterraneo per veicoli a due stadi, attraverso accordi da siglare con i paesi di sorvolo), il rilascio o il lancio la ricaduta in mare dei primi stadi, e a fine della missione, la deorbitazione con ricaduta in mare dell'ultimo stadio.

La configurazione aeroportata è vincolata in termini di prestazioni dalla taglia dell'aeromobile vettore, che limita la dimensione del veicolo di lancio e quindi la massa del carico utile e la posizione di lancio. Inoltre è discutibile la Certificabilità di un aeromobile e della relativa base aeroportuale per una missione che implichi il trasporto di propellente liquidi criogenici. Le attività di tracciamento e telemetria implicano comunque l'esistenza di basi di terra o di un ponte satellitare (DRS). Nel mondo, il concetto è ben sperimentato dal vettore Pegasus, con progetti annunciati da StatoLaunch del miliardario statunitense Paul Allen e LauncherOne del miliardario statunitense Richard Branson.

L'utilizzo di una piattaforma galleggiante come base di lancio implica vincoli meno stringenti sulla dimensione del veicolo di lancio e le operazioni sono intrinsecamente più sicure; al contrario, il tempo minimo di schieramento di un satellite è certamente più lungo di quello di un aeroportato e ovviamente di quello di base fissa, dovendo scontare la durata del trasferimento dal porto di armamento all'area di lancio. Un esempio ben noto è costituito dall'esperienza del consorzio Russo, Norvegese, Statunitense SeaLaunch, sciolto per difficoltà politiche e finanziarie dopo due fallimenti occorsi durante il lancio.

Modelli economici dei diversi sistemi di lancio da piattaforma mobile non rivelano alcuna convenienza economica della formula (in condizione di ipotesi comparabili con il lancio da piattaforma fissa). Essi possono rivestire, tuttavia, un interesse strategico per aspetti di sicurezza nazionale.

17.5 TECNOLOGIE PER LA SICUREZZA E LA TELEMETRIA

Due settori tecnologici, strettamente connessi, sono elementi critici per l'esercizio operativo dei veicoli di accesso allo spazio nei prossimi decenni, al fine di garantire la sicurezza delle operazioni e il corretto livello di informazioni durante il volo. In particolare:

- **sistemi autonomi di bordo per la terminazione del volo.** La disponibilità di un tale sistema, certificato e accettato dagli operatori di lancio e dalle autorità di sicurezza, riduce la criticità e le conseguenze gli eventi temuti nel corso della fase suborbitale della missione. Esso supera i limiti dell'intervento umano nella gestione della sicurezza del volo e elimina i rischi legati alla disponibilità del collegamento a radio frequenza tra basi di terra e veicolo. Gli elementi connotanti di tali architetture sono i dispositivi di localizzazione imbarcati e gli algoritmi di sicurezza del volo, in grado di prendere decisioni atte, nel caso di malfunzionamenti, a prevenire la caduta di frammenti su zone popolate;
- **sistemi di telemetria a larga banda basati su rete satellitare.** Questa tecnologia ha lo scopo di permettere la trasmissione di un flusso di dati a banda larga (ad es. sopra i 10Mbps) dal veicolo al centro di controllo basato a terra, durante le fasi di ascesa del veicolo di lancio, inclusa la parte della traiettoria al di sotto dei 60km di quota per la quale i servizi di ponte satellitare (es. TDRS, EDRS, Audacy) oggi sono praticamente indisponibili.

Gli elementi tecnologici critici per tale sistema sono le antenne, gli algoritmi di puntamento, i trasmettitori (ad es. banda Ka) che assicurino il corretto collegamento in radiofrequenza durante la traiettoria, esposte alle accelerazioni e all'ambiente termico e dinamico tipiche dell'ascesa.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Come è noto, il livello di energia necessaria per vincere la attrazione gravitazionale terrestre è molto alto: i veicoli di lancio la raggiungono in tempi dell'ordine della decina di minuti, mettendo in gioco potenze non comuni ad altre applicazioni umane. È per questo che gli aspetti di sicurezza sono prevalenti nella concezione e l'esercizio di un veicolo di lancio e ne costituiscono il vincolo principale, soprattutto durante le fasi suborbitali della traiettoria. In parallelo, la disponibilità di dati di volo, nelle fasi dinamiche del lancio, sono l'elemento chiave per la gestione in tempo reale della sicurezza e, per altra via, per il consolidamento e il monitoraggio del sistema di lancio. La gestione della sicurezza e il recupero dei dati di volo sono in buona misura legati alla capacità di sistemi a radio frequenza dislocati a terra in corrispondenza della traccia della traiettoria. Il costo di tali servizi è un elemento importante del costo del servizio di lancio (ad esempio 1-2M$ per volo) e il livello di copertura e la larghezza di banda disponibile sono insufficienti.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

L'Italia è stato il terzo paese nel mondo ad aver operato lanci spaziali. In continuità, oggi, ha una struttura industriale, scientifica ed infrastrutturale concentrata sul settore dei lanci in orbita terrestre bassa per satelliti da piccoli a medi: in quest'ambito costituisce il riferimento mondiale. Nei diversi domini tecnologici afferenti il settore, lo stato dell'arte è in veloce trasformazione. In particolare:

- sistemi di lancio parzialmente riutilizzabili: a valle della esperienza precorsa da Space X con i successi di Falcon 9 e Falcon Heavy che rappresentano il *benchmark* del settore, diversi attori globali stanno preparando soluzioni equivalenti. Negli Stati Uniti, il primo volo di New Glenn, bistadio da 35ton di carico utile in LEO è previsto per il 2020. In Europa vi è un fiorire di studi e dimostratori tecnologici (Prometheus, Callisto) e di avanprogetti (Themis) sviluppati da ESA, CNES e ArianeWorks, anche in collaborazione con JAXA che potrebbero portare ad un prodotto in servizio agli inizi degli anni 30. Un elemento del lanciatore cinese Lunga Marcia è in trasformazione per dimostrazione della configurazione VToVL (Vertical Take-off Vertical Landing): il Lunga Marcia 6X il cui volo inaugurale è previsto nel 2021, mentre per il Lunga Marcia 8 è annunciata una attività di sperimentazione per il rientro di precisione del primo stadio, basato su parafoil. In Russia non esistono piani di medio lungo periodo per dotare Soyuz 5 (il nuovo cavallo di battaglia che sostituirà la corrente pletora di veicoli da Proton, Zenith e Angara) di capacità di rientro per il primo stadio. Tuttavia il dimostratore Baikal (primo stadio alato e dotato di turbogetti presentato nel 2001) è un esempio concreto di architettura VToHL (*Vertical Take-off, Horizontal Landing*);
- piccoli Veicoli di Lancio: è il settore nel quale il fermento mondiale è massimo. Il precursore è il sistema Electron, sviluppato da Rocket Lab (Nuova Zelanda e Stati Uniti). Attualmente esistono decine di progetti negli Stati Uniti (Firefly con forte contributo di *know-how* ucraino, Relativity Space, Vector), India (SSLV), Cina. In Europa gli industriali PLD, Orbex, OHB Rocket Factory, AG Sparrow sviluppano i progetti più credibili con voli di dimostrazione previsti per il 2020 e 21. In Italia il progetto di riferimento è il Vega light, basato su elementi e tecnologie di derivazione Vega;
- estensione Servizi al carico utile: anche in questo ambito quasi tutti gli industriali del settore hanno progetti in sviluppo: tra questi si afferma la presenza di prodotti sviluppati da aggregatori ad esempio nell'ambito dei *dispenser.* L'Italia è attiva con il sistema VSS (Vega Space System) che accoglie realizzazioni anche di terze parti con lo scopo di allungare la catena del valore del sistema di lancio Vega. Ben posizionato è l'ambito dei servizi di *download*, grazie all'esperienza maturata nel programma europeo IXV e in fase di consolidamento nel progetto SpaceRider;
- lancio da piattaforme mobili: il cammino è ben tracciato negli Stati Uniti per entrambe le tecnologie, a partire dal precursore Pegasus ed includendo l'esperienza SeaLaunch in collaborazione con Russia e Norvegia. Il riferimento per l'aeroportato sono il Virgin Orbit LauncherOne e lo StratoLaunch;
- tecnologia per Sicurezza e Telemetria: molto attive le realizzazioni nei paesi per i quali le FAA sono le norme cardine per la Attitudine al Volo (ad es. Stati Uniti, Regno Unito e Nuova Zelanda). Fermento per i paesi che hanno deciso di dotarsi di uno spazioporto per decollo verticale (es. Portogallo e Norvegia).

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 18

SERBATOI E STRUTTURE DI NUOVA GENERAZIONE PER LANCIATORI E VEICOLI SPAZIALI

Negli ultimi anni le realizzazioni di serbatoi di grandi dimensioni per applicazione nei veicoli di lancio di nuova generazione si è decisamente orientata verso l'utilizzo dei materiali compositi senza *liner* (tipo V), anche per applicazioni criogeniche. Questa tecnologia ha chiaramente sostituito quella metallica per applicazioni su piccoli e medi diametri, mentre le costruzioni metalliche sono ancora diffuse per i grandi diametri (es. oltre i 5m). In pratica, la maggior parte dei piccoli lanciatori in sviluppo o operativi trae profitto dall'uso di serbatoi di tipo V in composito, mentre la transizione verso il composito è appena iniziata in Europa sulla scala Ariane 6 *Upper Stage* (il cosiddetto *Black Stage*, Programma Phoebus) ed è controversa sul BFR di Space X.



FIGURA 18.1 PHOEBUS (CREDIT ESA)



FIG. 18.2 VUS (CREDIT AVIO)

Studi tecnologici e *trade-off* propulsivi identificano per la taglia di Vega *Upper Stage* (lo stadio LOx-LNG del futuro Vega E) vantaggi consistenti in termini di prestazioni e economici nell'uso delle tecnologie in composito.

È ragionevole prevedere che le tecnologie metalliche rimarranno la scelta ottima per i serbatoi dei grandi primi stadi riutilizzabili nei prossimi 10-15 anni, mentre contemporaneamente, nei paesi occidentali, la transizione al composito tipo V sarà completata per tutte le applicazioni non riutilizzabili (ad es. stadi alti) indipendentemente dalla taglia.

Le tecnologie legate ai serbatoi e alle strutture pressurizzate in materiale metallico sono abilitanti per la realizzazione di moduli abitati operanti nello Spazio poiché avranno sempre di più, dal punto di vista della competitività, un'incidenza rilevante nelle future missioni in termini di ottimizzazione della massa e dei costi di produzione. La riduzione di massa, con leghe di nuova generazione e processi produttivi ad alto grado di automazione, si traduce infatti nella possibilità di

aumentare da un lato il carico pagante andando cosi a ridurre i costi di missione e dall'altro di ridurre i costi del prodotto ricorrente.
I serbatoi e le strutture pressurizzate metalliche, per consentire un incremento delle attuali capacità di trasporto, dovranno quindi basarsi sia sull'innovazione introdotta da leghe di alluminio di ultima generazione (ad es. Al-Li e Al-Mg-Sc), sui processi di stampa 3D di grande dimensione (vedi *Relativity Space*), su nuove tecniche di saldatura quali il FSW (*Friction Stir Welding*), abbinate alla serializzazione dei processi per gli elementi strutturali tipici che li compongono.
I materiali compositi trovano nelle strutture dei lanciatori spaziali, un campo ideale di applicazione grazie al margine di miglioramento delle prestazioni in peso rispetto ad equivalenti strutture in metallo. Lo sviluppo delle tecnologie e dei materiali base è stato spinto ad un punto tale da consentire, rispetto a componenti metallici, sia il miglioramento delle *performances* che la riduzione dei costi. I primi due decenni degli anni 2000 hanno segnato un salto generazionale nella diffusione su larga scala dei materiali compositi. Le spinte maggiori arrivano dalle esigenze di risparmio energetico in molti settori industriali. Si ritiene oggi indispensabile un impiego massiccio dei materiali compositi nel settore automotive se si vogliono raggiungere gli obiettivi di drastica riduzione dei consumi. D'altra parte, i dati raccolti da decenni di produzione aeronautica sulle strutture in composito, hanno fornito risultati molto confortanti anche rispetto alla vita a fatica di tali componenti, molto maggiore rispetto alle previsioni fatte in precedenza. La riduzione di massa nei veicoli spaziali gioca un ruolo fondamentale sia negli stadi bassi, dove le masse inerti sono ingenti, sia sulla parte alta del lanciatore, dove la riduzione di massa strutturale inerte si traduce in un immediato vantaggio in termini di capacità di trasporto. Nell'ambito della famiglia dei lanciatori Europei, mentre Ariane e Soyuz adottano soluzioni progettuali classiche per le strutture primarie metalliche, nel piccolo lanciatore Vega i materiali compositi hanno trovato applicazione in gran parte delle strutture primarie pressurizzate (ad es. involucri dei propulsori a solido realizzati con tecnica "*filament winding*"). Tuttavia, rimangono ancora numerose le possibili aree di intervento, sia relativamente alla sostituzione di strutture metalliche con strutture in composito, sia relativamente all'ottimizzazione delle possibili soluzioni tecnologiche dei compositi stessi. Le tecnologie automatizzate oggetto di questo obiettivo realizzativo sono in generale concepite per garantire componenti ad alte prestazioni, grazie al controllo rigoroso dei parametri geometrici di deposizione, direzionalità delle fibre e precisione di taglio, rispetto alle tecnologie tradizionali. In particolare si propone l'applicazione di compositi a serbatoi per motori a liquido della tipologia "*overwrapped*" e per la realizzazione di strutture interstadio mediante tecnologie automatizzabili (tipo "*anisogrid deposition*"). La concezione dei componenti sfrutterà l'uso di tecnologie trasversali come il cosiddetto "*Health Monitoring*".

18.1 GRANDI SERBATOI A BASSA PRESSIONE E STRUTTURE DI CONNESSIONE IN COMPOSITO LINERLESS

Elemento fondamentale per assicurare l'indipendenza e l'autonomia nello sviluppo dei lanciatori di nuova generazione è lo sviluppo di sistemi propulsivi **a liquido**, indispensabili per migliorare la flessibilità e la competitività del lancio. Per questi sistemi occorrono serbatoi di grandi dimensioni per propellenti liquidi **criogenici** per i quali, da oltre 50 anni, la tecnologia matura è legata al metallo, in particolare alle leghe di Al-Li.

Lo sviluppo di nuove tecnologie per la realizzazione dei serbatoi criogenici in composito per veicoli di lancio è riferibile ai risultati di *Concurrent Engineering*, in cui sono adattate le esigenze operative specifiche (ad es. i lanciatori hanno missioni della durata di ore, per cui i requisiti di permeabilità sono meno stringenti che per i satelliti), la disponibilità di materiali compositi e processi automatizzati, con criteri di progetto ottimizzati su configurazioni innovative, tra le quali le architetture *common bulk-head* e *linerless* (tipo V) fattibili con tali processi.

I **materiali compositi**, costituiti da resine termoindurenti o termoplastiche con fibre di carbonio, devono sopportare l'aggressione chimica degli ossidanti (es. LOx) mantenendo una adeguata impermeabilità. Nel caso dell'architettura *linerless*, i livelli di microfratture interno al materiale dovranno essere molto ridotti rispetto a quelli normalmente accettati nei serbatoi con *liner* (tipo III o tipo IV) per evitare, o almeno limitare, fenomeni di fuga e di propagazione di frattura nel guscio.

Nello stesso tempo, la richiesta di architetture *common bulkhead* implica una attenta analisi delle condizioni di carico e l'elaborazione di una configurazione che distribuisca in modo ottimale il carico dominante assiale tra il guscio impermeabile e la struttura di sostegno cilindrica esterna.



FIG. 18.3 ROBOTIC AFP (CREDIT BOEING R&T)

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Il miglioramento della frazione in massa degli stadi a propellenti liquidi criogenici, richiede un utilizzo esteso dei materiali compositi. L'introduzione di tali materiali nel settore aerospaziale non è una novità, poiché è ormai un dato acquisito il vantaggio del 30%-50% in termini di riduzione di massa, rispetto ai serbatoi e alle strutture metalliche. Le tecnologie proposte si profilano estremamente competitive anche dal punto di vista dei costi.

Per quanto concerne i serbatoi criogenici l'Italia non possiede un *background* consolidato, nonostante la propulsione criogenica sia largamente utilizzata in molti lanciatori. Un successo in questo ambito porterà ad un conseguimento strategico in termini di *know-how* e tecnologie industriali che pochissimi paesi al mondo hanno e, in particolare, nessuna nazione europea ancora possiede.

Lo sviluppo di serbatoi criogenici in composito è un elemento qualificante per il successo della famiglia di lanciatori Vega E il cui primo volo è previsto per il 2025.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Il campo di applicazioni di serbatoi di tipo V di piccole dimensioni (sotto i 1.500mm di diametro) è già piuttosto consolidato negli Stati Uniti. Sono disponibili sul mercato prodotti *off-the-shelf* di diverse dimensioni forniti da diverse compagnie statunitensi. Serbatoi di grandi dimensioni sono invece ancora da considerare con tecnologia in maturazione. NASA e Space-X stanno sviluppando prototipi fino a 9m di diametro per future missioni interplanetarie, ma anche di dimensioni più contenute destinati a lanciatori per missioni convenzionali e per il turismo spaziale.

Il progetto CCTD, *Composite Cryotank Technologies and Demonstration*, finanziato dalla NASA, ha confermato di recente, con le prime dimostrazioni in larga scala (2.4 e 5.5 metri di diametro), che il passaggio ad una tecnologia basata sul composito, invece che sul metallo, con un *manufacturing* automatizzato, permette risparmi di peso del 30% e di costo di circa il 25%. Il progetto, nato nell'ambito del *Technology Mission Directorate's Game Changing Development program* (GCD) nel 2011, ha assegnato a Boeing il contratto per la realizzazione dei due dimostratori e ha coinvolto in particolare le *facilities* NASA del *Marshall Space Flight Center* per il *testing* in condizioni criogeniche, completato nel 2018.

In ambito europeo esistono aziende francesi e tedesche che realizzano serbatoi per LOx e LH2; tuttavia la loro esperienza è molto vasta nel campo dei serbatoi criogenici metallici, ma non nell'ambito dei serbatoi in materiale composito con matrice polimerica.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

L'investimento complessivo necessario è dell'ordine 5-10 M .

18.2 PICCOLI SERBATOI IN COMPOSITO PER GAS AD ALTA PRESSIONE

L'idea alla base del serbatoio *overwrapped* (**COPV, *Composite Overwrapped Pressure Vessel***), è quello di disaccoppiare la funzione di impermeabilità ai gas (o liquidi) dalla resistenza strutturale. La barriera alla permeazione può essere costituita da un sottile involucro interno "*liner*" in materiale metallico o polimerico, rivestito da un rinforzo strutturale in fibra ad alta resistenza.
In questo modo è possibile minimizzare il peso della barriera, la cui deformazione è contenuta dall'avvolgimento esterno (*overwrapping*). Nel campo dei recipienti in pressione, la tecnologia del "*filament winding*" offre grandi vantaggi soprattutto dal punto di vista prestazionale e tecnologico, con un processo di deposizione automatica del materiale composito altamente ripetibile e affidabile.
Altro indiscutibile vantaggio di tali serbatoi è quello di risolvere aspetti critici delle strutture in pressione legati alla sicurezza: i serbatoi *overwrapped* sono infatti naturalmente in grado di soddisfare il requisito di LBB (*Leak Before Burst*) poiché l'eventuale propagazione di cricche nel "*liner*", con conseguente perdita di tenuta, provoca una depressurizzazione controllata del serbatoio. Nell'ambito delle normative internazionali sul rientro in orbita terrestre di oggetti spaziali è comunque non trascurabile il vantaggio offerto da strutture leggere, capaci di perdere integrità strutturale a causa dell'intenso riscaldamento aero-termodinamico, rispetto ai tradizionali serbatoi metallici (ad es. in titanio) che spesso sono tornati al suolo integri (requisito di disintegrazione al rientro).
I vantaggi prestazionali dei COPV rispetto a quelli in materiale metallico (alluminio, titanio), vanno coniugati con l'attenzione al contenimento dei costi: la scelta di materiali di tipo commerciale e la massima spinta all'automazione dei processi e dei controlli deve essere perseguita fin dalle prime fasi di progetto e di definizione del flusso di MAIT (*Manufacturing Assembly & Integration*).
Ci sono però molti aspetti di tipo tecnologico che vanno messi a punto, a partire dalla progettazione del sistema "*liner*" con avvolgimento in composito, fino ai dettagli dell'intero ciclo di *manufacturing*. Infatti, l'alta efficienza del sistema è legata alla capacità realizzativa dei "*liner*" a parete sottile (spessori che spesso scendono sotto il millimetro) che necessitano di elevata precisione in fase di formatura, saldatura e controllo non distruttivo. Anche la fase di avvolgimento e polimerizzazione dell'avvolgimento esterno può diventare dimensionante per questo tipo di oggetti. Da qui la necessita di prevedere e tenere sotto controllo il comportamento della struttura anche durante il ciclo tecnologico di fabbricazione (carichi durante avvolgimento e polimerizzazione). La congruenza del progetto passa quindi anche attraverso la gestione e messa a punto di strumenti di simulazione di processo.
Di grande interesse, specie per il contenimento dei costi, sono i cosiddetti serbatoi di tipo IV in materiale composito con *liner* di tipo polimerico. Oltre ad avere un costo notevolmente inferiore,

non hanno i problemi di *auto-frettage* (operazione preliminare di pre-stress del materiale modo da farlo lavorare in ambito lineare durante i cicli di pressurizzazione e depressurizzazione). La tecnologia di avvolgimento di tali tipi di serbatoio rimane invariata rispetto ai serbatoi con *liner* metallico.
L'obiettivo realizzativo è quello di produrre prototipi di 2 famiglie di COPV che hanno immediata ricaduta applicativa nell'ambito spaziale:

- serbatoi di gas pressurizzante, caratterizzati da un contenuto volume interno (diametro massimo 500mm) e da pressioni molto elevate (centinaia di bar). Questa tipologia di serbatoi ha applicazioni sia nel campo dei lanciatori per satelliti che nella propulsione satellitare stessa. Il prototipo di riferimento avrà un diametro di circa 400mm;
- serbatoi per propellente liquido. Le pressioni di esercizio sono intermedie (decine di bar);

Il prototipo di partenza è un serbatoio di circa 600mm di diametro. Nel caso specifico non verrà richiesta resistenza ai carichi di volo (ipotesi di alloggiamento del serbatoio su struttura primaria), ma viene richiesto un'interfaccia meccanica sul piano equatoriale del serbatoio.

In questo ambito, le attività più rilevanti per l'abilitazione allo sviluppo sono:

- analisi dei requisiti di base e preparazione della specifica tecnica;
- scelta dei materiali per il "*liner*" e delle tecnologie associate (ad es. tecnica di saldatura);
- qualifica materiali e dei processi tecnologici;
- fabbricazione prototipi e messa a punto del processo tecnologico;
- prove funzionali e di qualifica sui prototipi;
- *scale-up* del processo.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

È evidente la necessità di colmare un *gap* tecnologico rispetto ai *player* di riferimento europei e mondiali. Il *background* tecnologico in Italia è presente sia per ciò che concerne la conoscenza dei materiali che per le possibili tecnologie in gioco. I settori applicativi (sistemi di lancio, propulsione satellitare) sono presenti sia in Italia che in Europa, con potenziali ricadute su mercati più ampi (settore automobilistico e aeronautico).

STATO DELL'ARTE E ALL'ESTERO

Sono molto diffusi serbatoi di questo tipo presso svariate compagnie statunitensi, in uso ad esempio sulla ISS e sul lanciatore Vega. In ambito europeo la Francia (Ariane Group), la Germania (MT-Aerospace) e Austria (Peak) possiedono la capacità di fabbricare questi serbatoi in campo spaziale, nel settore *automotive* e per applicazioni civili (bombole per ossigeno ad alta pressione). Thales Alenia Space in Italia ha prodotto COPV per alta pressione, mentre in Avio sono stati fabbricati dei dimostratori *full scale*.

18.3 TECNOLOGIE DI SALDATURA PER COMPONENTI IN PRESSIONE

Le tecnologie di saldatura sono fondamentali nella realizzazione di serbatoi e strutture pressurizzate in materiale metallico e rivestono quindi un ruolo abilitante in ambito Spazio sia per l'ambito propulsivo sia per la realizzazione di moduli abitati orbitanti, per trasferimento planetario o per futuri avamposti di superficie. Tali tecnologie, rappresentando la parte più critica del processo costruttivo di tali strutture, hanno e avranno sempre di più, dal punto di vista della competitività, un'incidenza rilevante nelle future missioni sia in termini di ottimizzazione degli *standard* qualitativi che dei costi di produzione. La **riduzione di massa**, legata all'introduzione di leghe di alluminio di nuova generazione ad elevato rapporto resistenza su peso specifico e di nuovi processi di saldatura ad alto grado di automazione capace, per esempio, di saldare anche leghe non saldabili con le tradizionali tecniche per fusione, si traduce infatti nella possibilità di aumentare da un lato il carico pagante andando così a ridurre i costi di missione e dall'altro di ridurre i costi del prodotto ricorrente. Nel caso specifico dei serbatoi, l'estensivo utilizzo della **propulsione criogenica**, caratterizzata da un basso impatto ambientale grazie alla combinazione di propellenti quali **ossigeno-idrogeno** o **ossigeno-metano** (***Green Propulsion***), contribuirà poi ulteriormente ad aumentare le prestazioni del lanciatore in tutte le sue fasi di volo.

I serbatoi e le strutture pressurizzate metalliche, per consentire un incremento delle attuali capacità di trasporto, dovranno quindi basarsi sia sull'innovazione introdotta da **leghe di alluminio di ultima generazione (**es. **Al-Li** e **Al-Mg-Sc)** sia su nuove tecniche di saldatura quali il **FSW (*Friction Stir Welding*),** abbinate alla serializzazione dei processi per gli elementi strutturali tipici che li compongono.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Le motivazioni per lo sviluppo sono legate alla necessità di estendere le attuali capacità sulle tecniche di saldatura, con particolare riferimento alla tecnica FSW già disponibile in Thales Alenia Space in Italia a leghe di Alluminio di nuova generazione quali quelle citate sopra, ma soprattutto ad investigare a fondo le potenzialità che offre questo processo per quanto riguarda l'enorme gamma di spessori saldabili anche nell'ambito delle leghe di Alluminio più tradizionali attualmente utilizzate in ambito spazio della tipologia Al-Cu.

La saldatura per FSW è ormai considerata la tecnologia di riferimento per la giunzione di strutture pressurizzate in ambito Spazio poiché offre una serie di vantaggi rispetto alle tecniche di fusione tradizionalmente usate finora. In primo luogo il materiale del giunto non arriva a fusione ma è portato allo stato viscoso dal calore generato dall'attrito di una spalla e dal rimescolamento operato da un perno che affonda tra i 2 lembi di saldatura senza richiedere l'introduzione di materiale di apporto. Questo comporta una minore degradazione del giunto per effetto della temperatura che

si riflette immediatamente in prestazioni meccaniche più elevate e in una difettologia prossima a zero. In particolare tale tecnica consente di unire anche quelle leghe di alluminio ad alte prestazioni non saldabili con le normali tecniche per fusione. La FSW consente, inoltre, di unire leghe a diversa composizione chimica permettendo cosi l'utilizzo di leghe più prestanti per le parti strutturalmente più critiche. Questo processo comporta anche un più basso consumo energetico rispetto alle normali tecniche per fusione.
La possibilità di utilizzo di leghe diverse e di spessori che vanno dai 2 ai 50 mm offerta da tale tecnica richiede infatti lo sviluppo sia di attrezzature dedicate quali il perno e la spalla di saldatura sia di parametri di processo per realizzare saldature di qualità come tenuta strutturale e a basso indice di difettosità.
I bassi spessori si riferiscono in particolare all'applicazione a serbatoi criogenici in cui la parte cilindrica e le calotte, in cui porzioni di tali componenti, dopo aver subito un processo di formatura per ottenerne la necessaria curvatura, debbono essere uniti per formare il componente finale.
Gli elevati spessori si riferiscono invece alla possibilità di rimpiazzare pezzi semilavorati come i forgiati normalmente procurati per la realizzazione di anelli di interfaccia, ad esempio, unendo settori ricavati da piastre con il vantaggio di ridurre notevolmente i costi di sviluppo e qualifica dei forgiati nonché la tempistica di acquisto. È evidente che sfruttando tutte queste potenzialità offerte dal processo di FSW in termini di lega metallica e campo di spessori, si possono ridurre drasticamente tempi e costi di produzione con la conseguente possibilità di offrire un prodotto estremamente più competitivo. Gli sviluppi identificati, supportati da adeguate campagne di test su provini, possono quindi essere effettuati sfruttando sia l'impianto industriale che l'impianto pilota già disponibili in Thales Alenia Space.

In particolare le applicazioni che ne motivano lo sviluppo in campo spaziale riguardano:

- **serbatoi per Stadi di Lanciatori**, criogenici e non criogenici, in linea con la evoluzione prevista per gli attuali sistemi di lancio spendibili, ma anche per veicoli di lancio e rientro riutilizzabili: oltre al contenimento di pressione in entrambe le tipologie di applicazione è previsto che i serbatoi svolgano anche funzione portante dei carichi di volo per ottimizzare la massa del lanciatore;
- **moduli Spaziali Abitati**, permanenti in orbita o moduli cargo di rifornimento di stazioni orbitanti (ad es. Stazione Spaziale Internazionale).

Le tecnologie sono volte allo sviluppo ed implementazione in serbatoi di grandi dimensioni indicativamente date da diametri tra i 4 e 6m e lunghezze comprese tra i 10 ed i 15m e in moduli abitati aventi gli stessi diametri 3-5m, ma con lunghezze limitate ai 5-7m.
I requisiti delle strutture dei futuri lanciatori spendibili e riutilizzabili e dei moduli spaziali abitati per nuove stazioni orbitanti e gli obiettivi sempre più stringenti sui costi di produzione delle unità ricorrenti, rendono quindi necessaria l'evoluzione ed il potenziamento delle tecnologie di saldatura più avanzate quali la FSW per le loro parti costituenti e la loro sperimentazione e validazione su elementi rappresentativi e prototipi. Il risultato può effettivamente contribuire a mantenere e rafforzare l'industria nazionale nella propria posizione di eccellenza sia nell'ambito dei sistemi di lancio sia delle strutture orbitanti.

L'incremento di competitività si traduce in possibilità di successo nella partecipazione a programmi spaziali commerciali e delle Agenzie governative. In particolare nel caso di programmi ad elevato numero di ricorrenti annui sono inoltre evidenti ricadute occupazionali nel tempo per l'azienda ed il suo indotto.
I risultati dello sviluppo non sarebbero inoltre solo specifici al settore, poiché l'interesse nel campo delle tecnologie di fabbricazione di serbatoi di grosse dimensioni può avere ricadute anche su altri settori industriali (ad es. serbatoi per industria chimica, per termovalorizzatori) dove la qualità spinta del prodotto "spazio" può essere sfruttata per l'incremento della sicurezza ambientale.



FIG. 18.4 IMPIANTO DI SALDATURA FSW (CREDIT THALES ALENIA SPACE IN ITALIA)

Per potenziare le capacità di saldatura in termini di gamma di spessori e configurazioni di giunto per coprire le necessità derivanti dalle applicazioni sopra citate, le *priorità di sviluppo* riguardano essenzialmente i seguenti aspetti:

- messa a punto della tecnologia di saldatura FSW su diverse tipologie di spessore per coprire l'applicazione sia a strutture a parete sottile che ad elevato spessore, per velocizzare e ridurre i costi su parti semilavorate (ad es. anelli di interfaccia);
- sperimentazione su leghe di Al innovative ad elevate prestazioni e compatibili con il contenimento di fluidi criogenici;
- prove di sviluppo tecnologico per materiali base e saldati e su dimostratori rappresentativi di singoli elementi strutturali;
- definizione di un catalogo di difetti di riferimento per giunti saldati con l'applicazione di tecniche di controllo non distruttivo basate sia su ultrasuoni per l'indagine su difetti volumetrici che di correnti parassite per la valutazione di difetti superficiali;

- realizzazione prova di un prototipo (ad es. serbatoio criogenico) da sottoporre a prove in ambiente rilevante.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Per la realizzazione dei moduli di nuova generazione, Thales Alenia Space in Italia ha adottato il processo di saldatura innovativo *Friction Stir Welding* (FSW) che garantisce la produzione di giunti saldati con caratteristiche meccaniche migliori di quelle ottenibili con i processi di saldatura tradizionali.

Grazie a questa tipologia di saldatura allo stato solido, che non porta a fusione il metallo, è stato infatti possibile ottenere saldature di alta qualità, con basse deformazioni, per un'ampia gamma di materiali considerati non saldabili o metallurgicamente incompatibili. Il processo infatti non necessita di un'atmosfera protetta e richiede una quantità di energia minore rispetto alle tecnologie di saldatura per fusione.

L'impianto FSW attualmente in uso nella sede di Thales Alenia Space in Italia (a Torino) è il più grande impianto di questo tipo in Europa (saldature fino a 5m di diametro) e costituisce una innovazione molto importante nell'ambito dei moduli spaziali pressurizzati e di serbatoi per stadi di lanciatori. Il modulo Cygnus di rifornimento alla Stazione Spaziale Internazionale saldato in *Friction Stir Welding* è il primo modulo abitato a livello mondiale che utilizza la tecnica FSW: lanciato il 21 maggio 2018 e sganciato il 30 luglio 2018 dalla Stazione Spaziale ha già compiuto la sua missione con successo e si è distrutto al rientro in atmosfera secondo gli obiettivi della sua missione logistica. Tutta la produzione delle unità ricorrenti di Cygnus è incentrata sul processo di saldatura FSW.



FIG. 18.5 MODULO CYGNUS SALDATO CON TECNICA FSW (CREDIT THALES ALENIA SPACE IN ITALIA)

Gli altri maggiori sviluppi nel campo delle tecnologie di saldatura FSW per serbatoi sono riscontrabili soprattutto negli USA e sono in fase di sviluppo in Europa per il nuovo lanciatore Ariane 6.

18.4 TECNOLOGIE DI CONTROLLO OLISTICO E DI HEALTH MONITORING

Le logiche e le tecnologie di controllo olistico permettono la semplificazione della catena di controllo di componenti o sistemi, riducendone i costi e aumentandone l'efficacia. A monte di un sistema di *Health Management,* forniscono un'indicazione chiara dello stato del prodotto all'inizio della vita operativa. Per le strutture spaziali, generalmente sono basate su metodi di indagine globale che permettono l'identificazione di scostamenti morfologici, funzionali o di comportamento rispetto all'atteso e sono applicati sulla struttura nella sua interezza. Stante la dimensione e la quantità di dati da esaminare sono in genere supportate da un uso estensivo di software di diagnostica, spesso basati su concetti di intelligenza artificiale.

L'*Health Management Systems* (HMS) ha la funzione di monitorare e controllare le funzioni critiche di un Sistema o di componenti. Lo scopo è quello di assicurare uno svolgimento efficiente e sicuro delle operazioni dei sistemi spaziali durante l'intero ciclo di vita del sistema e dei suoi componenti.

Lo sviluppo di un sistema autonomo di HMS è strettamente legato alla importanza del sistema e dalla tolleranza al difetto o all'errore e al rischio di perdita della missione o delle funzioni.

L'intensità di azioni ostili al sistema definiscono il livello di HMS che risulta necessario al sistema.

Sistemi spaziali quali, ad esempio, i "*man rated*" risultano essere un campo importante per applicazioni di tecnologie di HMS.

Le priorità di sviluppo identificate riguardano:

- messa a punto delle tecnologie abilitanti relative al controllo olistico (in particolare tomografia, metodi ultrasonici su grande scala);
- messa a punto delle tecnologie abilitanti relative alle reti di sensori anche per verifica *health monitoring*;
- prove di sviluppo tecnologico su dimostratori rappresentativi di serbatoio e interstadi;
- definizione e realizzazione di un *network* di sensori per SHM in grado di monitore il comportamento strutturale e rilevare la presenza di difetti eccedenti i criteri di accettazione;
- realizzazione prova su prototipi in scala 1:1 in ambiente rilevante.

MOTIVAZIONE PER LO SVILUPPO

I controlli e il monitoraggio dello stato di salute rappresentano un elemento di costo estremamente rilevante nella produzione e messa in opera di strutture per uso spaziale (in alcuni casi, raggiungono il 30% dell'intero valore del componente). Tecnologie e logiche più efficaci in quest'ambito dovranno permettere un miglioramento dell'affidabilità e delle disponibilità del sistema uniti a sensibili riduzioni di costo.

Le principali motivazione per lo sviluppo di tecnologie di controllo olistico e nella messa a punto

di sistemi di *health monitoring* efficaci risiedono:

- nella riduzione de costo del prodotto e dei costi operativi attraverso la riduzione del tempo di attraversamento, la eliminazione di fasi intermedie della catena di controllo tramite il trattamento di dati ottenuti ad esempio da reti di sensori;
- nel miglioramento dell'affidabilità operativa delle strutture in esercizio attraverso il monitoraggio in continuo dello stato di salute.

Gli "*Integrated System Health Management System* (ISHM)" di un veicolo intero sono una necessità su programmi spaziali ad alta complessità che includono un numero elevato di componenti (attuatori, pompe, tubi, antenne, serbatoi, strumenti ottici, etc.).
La valutazione del livello di degrado o di anomalie risulta essere fondamentale per le operazioni di un sistema sin dalla costruzione dello stesso:

- quanto è sicuro o affidabile il sistema?
- quale livello di manutenzioni o riparazioni occorre eseguire su un sistema a prestazioni degradate o parti non più funzionanti o rotte?
- quali prestazioni il sistema mi può ancora permettere?

La corretta identificazione e la valutazione *in situ* dei problemi costituisce la base per il successo della missione.



FIG. 18.6 MCDONNELL DOUGLAS DC-XA WITH COMPOSITE LH2 TANK (CREDIT BOEING)

Le strutture spaziali, estremamente leggere, sia in materiale composito sia in metallo sono estremamente **sensibili ai danni dovuti a difetti di produzione, impatti, radiazioni, sollecitazioni termiche, di ambiente dinamico, ambienti termochimici aggressivi, contaminazione, problematiche elettriche, ecc...**
Gli impatti a bassa velocità che possono essere indotti durante le fasi di produzione, integrazio-

ne, movimentazione (danni accidentali) e in servizio, nonostante la progettazione *safe-life* ormai consolidata dei componenti, possono condurre in mancanza di appropriate fasi di controllo ad eventi catastrofici per l'intero sistema.
I principali obiettivi delle logiche di controllo e *Health Monitoring* associati con il danneggiamento da impatto sono:

- identificazione della tipologia di danno (micro fratture, delaminazioni o rottura di fibra);
- caratterizzazione della mutua interazione tra le diverse tipologie di danno da impatto;
- valutazione della degradazione delle caratteristiche meccaniche rispetto all'ammissibile usato in fase di progetto.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

La tecnologia **"IHMS"** è fondamentale per tutte le applicazioni spaziali *man-rated* e nelle missioni di esplorazione, sia per la salvaguardia dell'uomo sia per il successo delle missioni ad elevato contenuto tecnologico e quindi di costi.
La prossima fase di colonizzazione della Luna (gli Stati Uniti ipotizzano il 2024, i cinesi più o meno lo stesso periodo) lo sviluppo di lanciatori riutilizzabili (SpaceX) e di capsule di rientro (*manned*) con ridotto *refurbishment* e *re-flight* in tempi brevi necessitano di tecnologie *di health monitoring/management*.
Grazie a questa tipologia di tecnologie i costi saranno ridotti e l'affidabilità e sicurezza aumentate.
La sede di Torino di Thales Alenia Space in Italia ha sviluppato le basi per uno sviluppo di questa tecnologia che, a parte forse l'eccezione di Airbus (lato Sicurezza Aeronautica Civile), non vede molte altre realtà consolidate in Europa, mentre esistono grandi protagonisti negli Stati Uniti con ben definite collaborazioni tra grandi industrie (Boeing, Lockheed e Northrop-Grumman Corporation), con piccole imprese ad alta tecnologia (realizzatori di sensori e *hardware*) e Centri di Ricerca/Università (sviluppo di tecniche matematiche *di Data Mining* , ad esempio).
Le reti di sensori basati su fibre ottiche sono correntemente utilizzate nell'ingegneria civile per il monitoraggio di strutture. La loro comprovata efficacia le pone come naturale alternativa ai sensori di deformazione di tipo tradizionale (griglia metallica resistiva) e in quest'ambito sono attualmente utilizzate per il collaudo delle strutture pressurizzate di grandi dimensioni in Avio. L'applicazione in ambito *health monitoring* di tipo olistico, così come le applicazioni tomografiche su grandi strutture, non hanno per ora applicazioni diffuse in ambito delle grandi strutture spaziali.

18.5 STRUTTURE AD ALTA STABILITA' DIMENSIONALE DI TIPO ANISOGRID

Nell'ambito delle soluzioni per strutture ad alta stabilita dimensionale, come ad esempio gli interstadi e gli adattatori per il supporto del *payload* di lanciatori, un posto centrale è ricoperto dalle strutture innovative cosiddette ***"anisogrid"*** (ovvero *anisotropic-grid*). Esse rappresentano un concetto più generale e strutturalmente efficiente della più nota tipologia "*isogrid*" a semplici celle triangolari (originariamente realizzata in alluminio lavorato di macchina) che caratterizza molte delle strutture pannellari critiche in peso dei lanciatori Statunitensi. La struttura *anisogrid* consiste in un sistema regolare di nastri "*tow*" in fibra di carbonio interlacciati secondo traiettorie elicoidali e circonferenziali che formano sul pannello una serie di celle esagonali. La struttura *anisogrid* viene completata (ove richiesto per ulteriore incremento delle prestazioni strutturali) da una sottile pelle esterna "*skin*" in composito, co-curata all'ossatura di elementi di rinforzo unidirezionali. Rispetto alla struttura *isogrid*, nelle strutture *anisogrid* viene decriticizzata la gestione dei punti di intersezione delle maglie di fibra, riducendo lo spessore locale del laminato nei nodi.

Queste strutture possono essere realizzate attraverso deposizione automatica di tipo "*fiber placement*" o in "*filament winding*". La tecnologia di realizzazione può essere basata sul "*prepreg*" o attraverso tecniche di "*resin infusion*".

Particolarmente efficace dal punto di vista del contenimento dei costi risulta essere il processo di deposizione di fibra secca (priva di matrice) con tecnologia di *filament winding* e successiva infusione di resina. In questo caso, a valle dell'operazione di avvolgimento, segue quella di costituzione di un sacco che ricopre l'avvolto dentro il quale viene iniettata a bassa pressione la resina allo stato liquido. Per questo tipo di processo è necessario selezionare un sistema di resine in grado di avere bassa viscosità e di fluire in maniera omogenea all'interno del laminato.

MOTIVAZIONE PER LO SVILUPPO

Le ragioni che portano allo sviluppo di questo tipo di struttura risiedono sicuramente nelle elevate *performances* strutturali e nel globale contenimento dei costi, specie per il processo di infusione che potenzialmente non richiede l'uso di autoclave. Inoltre i requisiti di *shelf life* del materiale sono rilassati, poiché il catalizzatore e il polimero base vengono miscelati all'occorrenza, evitando lo stoccaggio in frigo del materiale.

L'efficienza strutturale dei componenti *anisogrid*, laddove i carichi critici possono risiedere nell'instabilità locale, è superiore sia a quella delle strutture metalliche che alle strutture a guscio in composito tradizionali. Nel settore aerospaziale, in particolare nelle aerostrutture (interstadi), il problema del *buckling* locale è dimensionante a causa della necessaria presenza di finestrature per l'accesso all'integrazione degli equipaggiamenti. Infatti questi ultimi costituiscono masse locali soggette ai carichi inerziali del lanciatore, che agiscono come carichi concentrati che amplifi-

cano le deformazioni locali in accoppiamento con i carichi generali del lanciatore (carichi di natura aerodinamica).

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Questo tipo di struttura ha trovato le sue prime applicazioni sui lanciatori sovietici, dove è stata sviluppata da Vasiliev. In Italia, è attualmente in sviluppo l'interstadio 2-3 del lanciatore Vega-C realizzato da Avio in collaborazione con il CIRA. I test di qualifica sono programmati entro il terzo trimestre 2019.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 19
ADDITIVE MANUFACTURING

Il ventaglio delle tecnologie che oggi realizzano la frontiera della produzione "additiva", tecnicamente ascritte alla definizione di "*Additive Layering Manufacturing*" (ALM, spesso semplificato in **AM**), sono in piena esplosione in molti ambiti sia come obiettivi realizzativi che come diversificazione delle soluzioni. Al contempo stanno crescendo sia la rapidità che la affidabilità realizzativa e, conseguentemente, la prospettiva industriale globale. Questo insieme di tecnologie è destinato, nel suo complesso, a **riscrivere il paradigma produttivo a livello mondiale** per i positivi impatti sullo sfruttamento delle risorse, sulla logistica, sui nuovi possibili modelli di *business* e, non meno importanti, per gli effetti sociali connessi (*re-shoring* delle produzioni, per esempio, ma anche rimodulazione delle categorie professionali). A fare da traino in questo impetuoso sviluppo sono oggi i settori a maggiore contenuto tecnologico (aerospazio e *motor-sport*) quando a guidare è principalmente la ricerca di prestazioni di punta.
Ma oltre per questi settori forte e crescente è la domanda anche nell'ambito medicale (protesi, impianti dentali, ecc.) e, a breve, anche l'industria di base, ed in particolare l'automobilistico, consolideranno questa svolta epocale. Un esempio di realizzazione sperimentale di un corpo motore in lega di alluminio è fornito nella Figura 19.1.

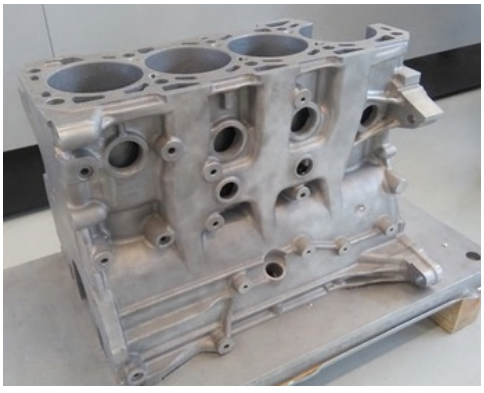


FIG. 19.1 ESEMPIO DI STAMPA METALLICA DI UN ASSIEME COMPLESSO (CREDIT ZARE S.R.L)

I passaggi chiave saranno, oltre che al consolidamento dei processi attuali, il loro ampliamento, consentiti da materiali alternativi più adeguati alle produzioni seriali a basso costo (per es. i tecno-polimeri). È infatti naturale considerare l'AM una tecnologia (useremo, di qui in poi, la dicitura al singolare per praticità) pilastro della **Fabbrica 4.0,** in quanto anello terminale e realizzativo (in termini fisici) di un processo completamente digitale a monte, esaltandone la flessibilità.

In breve, la tecnologia AM realizza il concetto di creare una parte mettendo per strati successivi il materiale dove serve (approccio "additivo") piuttosto che "liberare" la forma finale del pezzo da un blocco iniziale e sovrabbondante di materiale grezzo (approccio "sottrattivo", quello tradizionale). Sono quindi evidenti i vantaggi inerenti a questa tecnologia: risparmio di materiale base, possibilità di forme ottimizzate verso le funzioni e rispetto alle prestazioni richieste, facile "customizzazione" dei prodotti, efficienza produttiva anche per piccole serie o addirittura per singoli pezzi, teorico annullamento del magazzino parti (stampa "*on-demand*") sulla base del relativo "*file*".

Questa tecnologia quindi, nata e sviluppata inizialmente per il "*rapid prototyping*", ha ormai completamente virato verso il "*direct digital manufacturing*". Tuttavia sarebbe sbagliato pensare all'AM come una tecnologia facile o che magicamente abbia già risolto ogni risvolto pratico della sua applicazione.

A parte gli aspetti più strettamente tecnici e di qualità (quali per esempio la definizione di accettabilità pratica dei possibili difetti sui pezzi stampati), la convenienza di questa tecnologia va verificata caso per caso rispetto all'approccio tradizionale "sottrattivo", dovendo considerare nel bilancio globale le operazioni post-stampa (processi termici, finitura meccanica, ecc.) e, oggi, i maggiori costi per la verifica del prodotto finito (controlli non distruttivi, test su parte gemella "sacrificale", provini di vario genere, ecc.).

Tipicamente pezzi complessi (vedi Figura 19.2) da realizzare in piccole serie sono oggi potenzialmente convenienti in tecnologia AM rispetto a produzioni seriali di parti semplici, appannaggio dei metodi "tradizionali".



FIG. 19.2 ESEMPIO DI STAMPA METALLICA PEZZO A GEOMETRIA COMPLESSA (CREDIT BEAMIT S.P.A.)

Ma la soglia di questo punto di parità si sta progressivamente spostando a favore dell'AM sia per l'affinamento della tecnologia (che riduce i costi di verifica dei pezzi stampati) che per l'introduzione di **nuove tecnologie/macchine orientate alla produzione di massa**. In generale poi, ed è importante sottolinearlo, cruciale è l'aspetto dei tempi, generalmente molto a favore dell'AM, anche con fattori di riduzione 10x, quando in presenza di complessità realizzative.

Ancora più strategiche sono le forti economie di processo permesse dall'AM quando il confronto è esteso a tutti gli aspetti di produzione (logistica e amministrazione di produzione, trasporti, magazzino, sfridi, ecc.).

Quest'ultimo aspetto è particolarmente importante laddove la parte realizzata in AM possa rappresentare la sintesi di più componenti che, nella realizzazione tradizionale, sarebbe stato necessario produrre separatamente ed assemblare poi. In alcuni ambiti, esempio quello motoristico, dove più funzioni possono essere vantaggiosamente integrate in uno stesso "blocco realizzativo", si possono raggiungere fattori di riduzioni parti anche di 80 volte, con straordinarie semplificazioni in tutti i risvolti di produzione e del ciclo di vita operativo (es. affidabilità e manutenzione) dell'oggetto considerato.

Ma se tutti questi aspetti sono ormai evidenti, non bisogna cadere nell'errore di relegare questa tecnologia nel limitativo ambito di semplice processo produttivo, per quanto innovativo, "*green*", "*smart*", ecc. La maggiore valenza di questa tecnologia è quella di permettere **sinergie tra forme e materiali al fine di produrre oggetti concettualmente nuovi**. Attorno a questo aspetto ruoteranno quindi macchine e processi dedicati, materiali progettati "*ad hoc*" e funzionalità operative oggi non esistenti, che costituiranno lo stimolo creativo per gli oggetti che saranno realizzati ed utilizzati in futuro. Ma non solo: infatti anche l'ambito del *software* ha ricevuto già un impulso all'adeguamento e sarà vieppiù soggetto ad ulteriori sviluppi a supporto delle varie tecnologie additive. Oltre alla componente SW legata ai processi di stampa "additiva" implementati nei macchinari, particolare è stato e sarà l'adeguamento dei *tool* SW a supporto dei progettisti e degli *end-user* del 3D Printing.

Per esempio i SW di ottimizzazione strutturale si sono evoluti verso la ottimizzazione topologica, che crea forme "efficienti" (per es. massimizzando il rapporto rigidezza/massa) in base al criterio di mettere il materiale solo dove serve, approccio da cui si originano le forme cosiddette "*bio-inspired*", Figura 19..3). Ma anche gli strumenti CAD si sono dovuti adeguare a funzioni come lo *smooting* delle superfici per poter ottenere forme regolari a valle della ottimizzazione topologica.

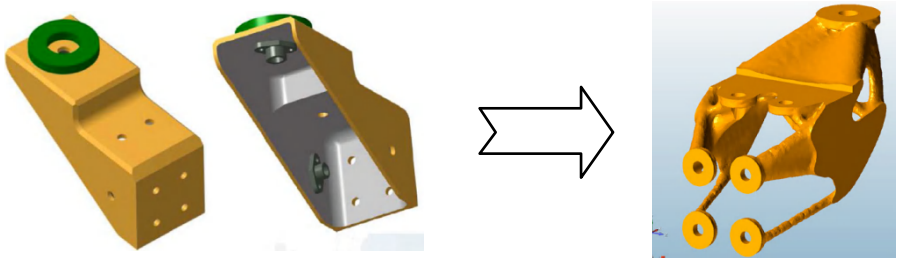


FIG. 19.3 ESEMPIO DI FORMA BIO-INSPIRED, A DESTRA, RISPETTO AD UNA FORMA TRADIZIONALE (CREDIT THALES ALENIA SPACE IN ITALIA)

Inoltre, le specificità applicative di ogni tecnologia "additiva" hanno portato a SW, più o meno integrati in ambienti CAD già esistenti, in grado di assistere il progettista nella impostazione realizzativa del pezzo al fine di poter sfruttare appieno le elevate potenzialità offerte dalle tecnologie additive minimizzando, al contempo, i rischi di insuccesso in fase di stampa. Molto spesso questi SW sono operati in fase realizzativa (ingegneria di processo, competenza del *Print Service*) piuttosto che progettuale in senso stretto, visto che il loro impiego è molto più orientato alla fase di

stampa implicando quindi la conoscenza di problematiche anche pratiche del materiale, del processo e della specifica macchina impiegati.
Il CIRA è per esempio impegnato sullo sviluppo di strumenti software allineati con il concetto del *think additive*. In tal senso si lavora su due tematiche principali:

- *tool* di ottimizzazione topologica per lattice structure che siano in grado di fornire modelli CAD finiti e pronti per la stampa (Figura 19.4);
- *tool* di simulazione avanzati del processo di stampa per la predizione del campo di temperatura nel dominio dello spazio e del tempo durante l'intero processo di produzione, finalizzati all'ottimizzazione dei parametri di processo per nuove classi di materiali.

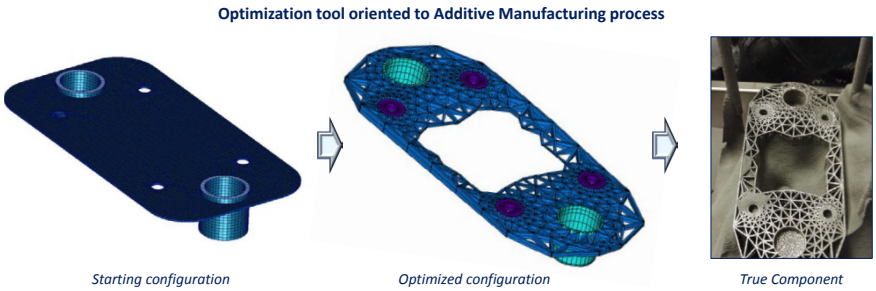


FIG. 19.4 PROCESSO DI OTTIMIZZAZIONE TOPOLOGICA CON STRUTTURA "LATTICE" (CREDIT CIRA)

Fatta questa necessaria premessa, vediamo come la tecnologia additiva sia proiettata oggi e nel breve termine nelle applicazioni spaziali con particolare riguardo (al fine di dare un perimetro allo svolgimento del tema) all'ambito termo-meccanico di una generica piattaforma spaziale. È importante fare questa puntualizzazione in quanto l'AM, stante la sua eccezionale flessibilità applicativa, è vista come una tecnologia abilitante in settori di grandissimo potenziale come quello elettronico o in quello dell' "*In Orbit Servicing*" o per la colonizzazione dello spazio.
Per fare il punto sulle implicazioni attuali e crescenti dell'AM in ambito spaziale, saranno analizzati i seguenti aspetti:

- le tendenze applicative;
- le tecnologie di processo;
- la frontiera dei materiali.

19.1 LE TENDENZE APPLICATIVE

L'impiego della tecnologia "additiva" nell'ambito termo-meccanico delle piattaforme spaziali ha preso le mosse con l'utilizzo del processo di fusione di materiali metallici in polvere (tipicamente leghe di alluminio e titanio). Le prime applicazioni, molto spesso selezionate con un prudenziale approccio di sostituzione (per "provare" la tecnologia), si sono limitate a strutture di supporto di piccole dimensioni o a particolari meccanici minori. Nonostante il limite di questo approccio si sono subito confermati i vantaggi di questa tecnologia. Tra i principali sono un significativo miglioramento prestazionale (in particolare rigidezza su massa), una maggiore efficienza del processo di *design* e documentazione tecnica ma anche una forte sintesi in fase realizzativa, soprattutto per gli oggetti che normalmente sono assiemi di più parti.
Il complesso di questi aspetti permette una **riduzione di tempi e di costi**, un aumento della affidabilità del prodotto finale **ma anche una semplificazione logistico-amministrativa** dei processi industriali della produzione. Gli insegnamenti principali di queste prime esperienze applicative sono stati quindi recepiti e stanno generando le premesse per la fase in cui questa tecnologia sarà molto più diffusamente impiegata.

Infatti, nonostante i costi "accessori" che l'impiego spaziale dell'AM tuttora richiede per la certificazione al volo (controlli estensivi, test di qualifica su modelli dedicati, campagne di *test* su provini, ecc.), è ormai assodato un ampliamento applicativo dell'AM nell'ambito delle strutture di satellite.
Ma le vere aspettative di crescita nell'impiego dell'AM nell'ambito termo-meccanico di una piattaforma satellitare sono costituite, nel breve-medio termine, dai seguenti punti verso la piena maturità applicativa:

a) La qualifica dei processi AM per l'impiego spaziale

La qualifica di processo è un passaggio fondamentale per un impiego economico della tecnologia AM in campo aerospaziale. Il compimento di uno stato di qualifica di processo per un dato materiale e finalizzato a determinate tipologie applicative, porterà all'impiego diretto di un determinato componente stampato senza l'attuale *overhead* dei costi di controllo e validazione. Idealmente, quando tutti gli elementi della catena che porta alla realizzazione del singolo pezzo siano ben identificati in prefissati e validati campi di variabilità (il pezzo può essere considerato valido per l'uso). Questo implica il **controllo di tutta la filiera di produzione** a partire dalla qualità dei materiali in ingresso, dal loro impiego effettivo (incluse pratiche di riciclo), dallo stato di calibrazione della macchina di stampa, dal controllo sulla corretta esecuzione del *job* di stampa e, infine, dalla verifica dei provini di produzione.
Ovviamente questo risultato dovrà essere perseguito per ogni soluzione tecnologica (**trinomio**

processo-materiale-macchina) e verosimilmente messo a punto per classi di tipologie applicative.

b) La crescita dimensionale delle parti

Oggi il limite operativo più evidente delle tecnologie a fusione di polveri metalliche (SLM-DMLS o EBM, quelle considerate tra le più mature) è rappresentato dalle dimensioni massime raggiungibili (tipicamente entro volumi cubici di 400mm, più raramente fino a 800mm ma solo su una dimensione). Questo limita l'adozione della tecnologia AM per pezzi più significativi sia in termini di presenza sulla struttura che di sua importanza.

Tuttavia se sul superamento del vincolo dimensionale si sta lavorando con lo sviluppo di nuovi processi (indicati di seguito), l'uso dell'AM su pezzi strutturali primari e/o secondari è comunque da coniugare con nuovi "*concept*" architetturali di satellite, questo per beneficiare al massimo del potenziale di forme ottimizzate e funzionalmente integrate. Un esempio di *building block* per micro-satelliti, con funzioni strutturale primaria e secondaria integrate, basato su struttura "*lattice*" in alluminio e stampato con tecnologia SLM, è riportato in Figura 19.5.



FIG 19.5 BUILDING BLOCK TERMO-MECCANICO PER CORPO MICRO-SATELLITE IN STRUTTURA "LATTICE" TRIDIMENSIONALE (CREDIT THALES ALENIA SPACE IN ITALIA)

In questa ottica non è improbabile che già la prossima generazione di satelliti potrà adottare soluzioni strutturali fortemente alternative in grado di adattarsi alle esigenze di carico di ogni singola missione senza dover riprogettare e/o riverificare in dettaglio l'intera struttura. Su questo percorso ibrido, tra evoluzione dei paradigmi progettuali e tecnologia, peserà ancora nel breve termine la applicazione di adeguati fattori di sicurezza, ma la strada verso strutture ad alto carico specifico è ormai segnato in favore delle emergenti tecnologie AM;

c) L'integrazione funzionale

Un altro aspetto fondamentale per la ottimizzazione tecnico-realizzativa delle nuove architetture satellitari è la ricerca di integrazioni funzionali sullo stesso oggetto. In questo ambito il primo e fondamentale passo sarà la fusione degli aspetti meccanico-strutturale con quelli termici di satellite, con l'obiettivo finale di generare soluzioni che siano più leggere e più facilmente produci-

bili rispetto la somma delle componenti strutturali e termiche oggi lavorate ed implementate in fasi disgiunte. Nello scenario complessivo va considerato poi il vantaggio di poter gestire a livello CAD fino ad un passo dalla stampa le interazioni e gli aggiustamenti tra queste due componenti progettuali. Ciò rende estremamente vantaggioso l'approccio basato sulla tecnologia AM sia per avere prestazioni ottimizzate che per il *time-to-market* complessivo del prodotto finale.
Oggi infatti l'approccio corrente richiede vari passaggi ed iterazioni per il progetto del *layout* di satellite, il *design* strutturale e quello termico. La modifica di uno di questi punti richiede la rielaborazione degli altri con impatti sia sulla documentazione realizzativa che su tempi e costi.

d) L'impiego di materiali alternativi ai metalli

Non completamente disgiunta dalle considerazioni fatte ai punti precedenti ma comunque valevole di una sua indipendenza concettuale, è la ricerca sui materiali alternativi ai metalli per le applicazioni spaziali. Fatti salvi gli aspetti di compatibilità con l'ambiente orbitale e funzionali-prestazionali, esiste una vasta gamma di esigenze realizzative a bordo di una piattaforma satellitare che potrebbero beneficiare dall'impiego dei **polimeri "stampati-AM" in termini di massa, costi e tempi realizzativi**. La prospettiva applicativa spazia dalla componentistica di collegamento a quella di piccole parti meccaniche di fissaggio/supporto fino ad alcune tipologie di strutture terziarie (supporti meccanici per unità elettroniche/sensori, ecc.). Anche qui il punto della convenienza, e quindi la scelta dei materiali e dei processi, sarà un *driver* importante nella spinta all'AM non metallico. In particolare l'aspetto dei processi (e dei relativi macchinari "industriali") sta già evolvendo verso le produzioni massive, con relativo importante abbattimento dei costi. Questo favorisce gli scenari applicativi per diverse soluzioni di tecno-polimeri (Ultem 9085, PA12 e soprattutto PEEK) che possono coprire svariate tipologie realizzative, numericamente importanti a bordo di un singolo satellite. Ma il quadro è più interessante se si considera la emergente tendenza delle mega-costellazioni di migliaia piccoli satelliti la cui produzione, esasperata per tempi e costi, richiederà un approccio "*simil-automotive*", in cui domineranno materiali e processi a basso costo.
Infine, affianco a questo scenario di erosione rispetto ai metalli, si svilupperà sempre più il settore dei tecno-polimeri per le applicazioni degli "*smart object*" a bordo dei satelliti. I materiali coinvolti, manipolati in termini costitutivi (ad es. tramite opportuni drogaggi) oppure sapientemente stampati sfruttando loro variazioni e/o loro proprietà in fase di stampa, conferiranno capacità funzionali anche multi-disciplinari. La loro coniugazione con geometrie particolari potrà condurre a parti che, combinando proprietà meccaniche, termiche, elettriche, magnetiche, ecc., anche differenziate da zona a zona, siano in grado di **realizzare funzioni multiple oppure adattive** in relazione ad un dato stimolo o alle diverse fasi di missione, per esempio.

e) Il 4D Printing

La nuova frontiera della stampa diretta di oggetti è il "*4D printing*" dove la quarta dimensione è data dalla **variabile tempo**. Infatti l'oggetto stampato, per via delle proprietà connaturate sia al materiale usato che alla sua particolare forma, può assumere nel tempo geometrie diverse quando sottoposto a specifiche condizioni ambientali o attivato da particolari stimoli (*Shape Memory*

Effects). Questa nuova frontiera è attesa diventare molto importante nei settori industriali del biomedicale, della difesa e dell'aerospazio. Un esempio molto interessante in ambito spaziale è quello di dispiegare oggetti o superfici a partire da un "impacchettamento" ad alta densità. Questo tipo di caratteristica funzionale è molto interessante per antenne, generatori solari, booms di strumenti scientifici, ecc.

f) La manifattura in orbita

La tecnologia della fabbricazione additiva è naturalmente predisposta per supportare le tematiche della proiezione umana nello spazio ma anche, per via della assenza di gravità, può avere particolari declinazioni con ricadute sulle applicazioni terrestri. In questo paragrafo saranno considerati alcuni aspetti salienti di questa nuova frontiera: il supporto logistico, la realizzazione in orbita di oggetti voluminosi e la produzione in assenza di gravità.

Supporto Logistico

Le future imprese spaziali con equipaggio a bordo come la colonizzazione della Luna o le missioni di lunga durata verso Marte richiederanno un elevato grado di autonomia in quanto allontanandosi dalla Terra i rifornimenti sono molto difficili e costosi. La possibilità di realizzare a bordo gli oggetti necessari diventa una risorsa preziosa e la stampa 3D è attualmente la tecnologia di produzione più accreditata per tali scopi. Ad oggi le esigenze possono ricondursi a due filoni principali, con ipotesi di stampa all'interno del volume pressurizzato di un modulo orbitante (tipo la International Space Station) di:

- parti inizialmente non previste nella missione e perciò non presenti a bordo. I casi possono essere diversi: attrezzi particolari per operazioni di manutenzione non programmata oppure oggetti che possono risolvere inconvenienti inattesi. Un esempio è rappresentato dall'**esperimento POP 3D** (Figura 18.6) realizzato da un consorzio formato da Altran, Thales Alenia Space ed Istituto Italiano di Tecnologia, che hanno prodotto, lanciato in orbita ed utilizzato a bordo della ISS la prima stampante polimerica 3D europea, con cui è stata dimostrata la possibilità di stampare in condizioni di micro gravità;
- parti di cui si è prevista la costruzione a bordo solo in caso di bisogno. Notevole infatti sarebbe la lista delle parti di ricambio teoricamente necessarie a bordo e tale da sviluppare masse e volumi non compatibili con l'economicità delle missioni spaziali. Avere quindi la possibilità di costruire un pezzo di ricambio solo se necessario, avendo portato nello spazio solo modiche quantità di materia prima, rappresenterà sia una grande flessibilità che un vantaggio strategico a fronte dei vincoli di lancio (massa, volume e costi).

Costruzione in orbita di oggetti voluminosi

L'idea di realizzare direttamente in orbita delle infrastrutture di grandi dimensioni scaturisce dalla esigenza di ovviare ai forti vincoli imposti dalla fase di lancio dei manufatti terrestri. Infatti la fase di lancio impone requisiti strutturali molto maggiori rispetto ai carichi di esercizio in orbita, per i quali le strutture potrebbero essere configurate in modo molto più semplice, realizzate con meno materiale e quindi anche più leggere. Ma non solo: le problematiche di lancio riguardano anche la

massa e le dimensioni dell'oggetto che si intende mandare nello spazio. Le capacità dei lanciatori sono limitate e soprattutto i volumi delle capsule (*fairings*) limitano fortemente le dimensioni dei satelliti e dei loro carichi paganti (tra cui antenne o strumenti di bordo, Figura 19.6), ma anche dei moduli abitativi pressurizzati.

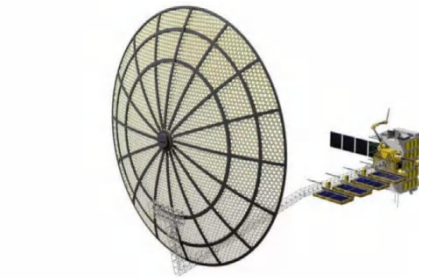


FIG. 19.6 "PICTORIAL VIEW" DI UNA SOLUZIONE CON RIFLETTORE DI GRANDI DIMENSIONI (CREDIT THALES ALENIA SPACE IN ITALIA)

La tecnologia di stampa 3D è vista, in una prospettiva non così lontana, molto promettente per costruire in orbita, per esempio, antenne di grandi dimensioni oggi incompatibili con i lanciatori disponibili. Progetti in questo senso sono stati avanzati da alcune ditte americane come *Made-in-Space* che, con il progetto Archinaut, prevede di utilizzare la stampa 3D a base polimerica per produrre oggetti in orbita che verrebbero poi assemblati da un sistema robotizzato.

Produzione in assenza di gravità

In una ottica diversa, la stampa 3D è anche promettente per le ricadute sulle applicazioni terrestri. Infatti sfruttando l'assenza di gravità, si possono produrre materiali di qualità superiore rispetto a quelli "terrestri". Due esempi degni di nota sono:

- fibra ottica di alta qualità (ZBLAN): l'ambiente micro-gravitazionale consente di produrre **fibre ottiche** le cui superiori prestazioni possono fare la differenza nelle tecnologie dei dispositivi medici e delle telecomunicazioni;
- bio-Stampa 3D a gravità zero: In questo processo, la bio-stampante 3D estrude e deposita a strati più sottili di un capello una miscela contenente un bio-inchiostro. Le aziende *Biofical Organs, Techshot* e *nScrypt*, supportate dalla NASA, stanno collaborando per **sviluppare una "bioprinter 3D"** in grado di stampare in ambiente micro-gravitazionale il **tessuto cardiaco** utilizzando cellule staminali umane.

19.2 LE TECNOLOGIE DI PROCESSO

La apertura della "tecnologia additiva" sui vari ambiti applicativi, anche molto distanti tra loro, sta favorendo su scala globale lo sviluppo di molti processi che utilizzano approcci diversi in funzione dei materiali e dei principali scopi realizzativi mirati. Pertanto restringeremo la descrizioni ai processi oggi più maturi e di quelli di più probabile adozione a breve, ovviamente nello scopo delle principali applicazioni di interesse spazio.

a) Processi a Fusione di polveri in letto (SLM-DMLS, EBM)

Sono i processi "storici" con cui la tecnologia AM ha virato verso la fase industriale soprattutto nei settori di maggiore richiesta di prestazioni ed affidabilità (es. aerospazio). La loro essenza prevede la fusione tramite laser (SLM, Figura 19.7) o per fascio di elettroni (EBM) di un strato sottile di polvere metallica disposto passaggio dopo passaggio nel volume di stampa della macchina fino alla ultimazione del pezzo.

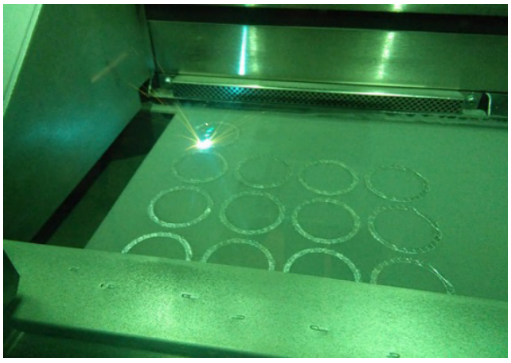


FIG. 19.7 IMMAGINE DI FUSIONE LASER PROCESSO SLM (CREDIT ZARE SRL)

Hanno in comune una intrinseca limitazione sulle dimensioni dei pezzi realizzabili e sulla velocità di stampa (ma l'EBM è più veloce degli altri due) offrono mediamente buone precisioni e capacità di dettaglio, rugosità superficiale medio-alta (la cui accettazione dipende però dall'impiego finale), contenuto rischio di difetti e relativamente basse distorsioni (meglio con la tecnica EBM).
Esigono una attenta definizione sia del "*file*" CAD del pezzo e del relativo "*slicing*", che dei relativi supporti di sviluppo in fase di stampa, per garantire la corretta geometria finale ed anche, trattandosi di un processo metallurgico, di un adeguato *setting* dei parametri di stampa per evitare sovra/sotto fusione locali che potrebbero innescare stress residui (e quindi distorsioni) e varie tipologie di difetti (porosità, micro-cricche, *layers* localmente non saldati, ecc.).

In questo ambito importante è la ricerca che mira alla intercettazione durante la stampa dei difetti soprattutto per parti complesse e difficilmente ispezionabili e, in un futuro a breve, alla loro correzione durante il processo stesso.

b) Processo di fusione di polveri proiettate su fascio laser (Laser Metal Deposition, LMD)

Questa tecnologia promette di superare sia il limite dimensionale delle parti prodotte che quello della velocità di stampa, tipici della SLM. Il principio è quello di proiettare nel punto di deposizione sia il flusso di materiale in forma di polvere che il fascio *laser* che fornisce l'energia termica di fusione. In modo coordinato e contemporaneo avviene sia la fusione del supporto esistente (materiale già depositato) che quella del nuovo materiale proiettato. La testa snodata si sposta velocemente sul pezzo in creazione determinando, insieme alla intensità dei flussi di cui sopra, lo spessore e la curvatura geometrica del pezzo. La velocità di deposizione in termini di massa di materiale (g/hr) può essere anche più dieci volte maggiore di quella SLM e le dimensioni dei pezzi possono arrivare anche oltre il metro cubo.

Questa tecnologia non permette la realizzazione di dettagli spinti, ed è meno precisa della SLM, ma assicura una gestione più agevole del processo di stampa e si presta anche alla riparazione di difetti di stampa o per danneggiamenti della parte in fase operativa.

Questa tecnica è la più promettente come miglior compromesso per la realizzazione di parti di adeguata complessità, dimensioni e precisioni nelle applicazioni delle piattaforme spaziali.

c) Processo di fusione di filamento metallico (WAAM)

La *Wire-Arc Additive Manufacturing* (WAAM) utilizza il materiale di accrescimento in forma di filamento metallico che viene posizionato nel punto di deposizione in cui un arco elettrico lo fonde. È ancora più veloce rispetto alle tecniche di deposizione a polvere (velocità di deposizione superiori a 1 Kg/h) e permette di realizzare pezzi di dimensioni di qualche metro. Questa tecnica è ancora meno precisa della precedente ma rappresenta una valida soluzione quando grandi pezzi debbono essere realizzati in unica soluzione. Questa tecnologia è anche usata per realizzare una base grezza per delle lavorazioni successive che portino il pezzo al suo profilo finito e con le giuste tolleranze alle interfacce. In questo caso è premiato il rapporto *fly-to-buy* (ossia di quanto materiale effettivamente rimane nel pezzo di volo rispetto quanto acquistato) dove l'alternativa è tipicamente rappresentata da forgiati di grandi dimensioni di costoso e lungo reperimento sul mercato (se non quando procedere a complessi e costosi assemblaggi di più parti). Presenta problematiche di potenziali mancate fusioni tra gli strati di successive deposizioni e tipicamente richiede l'apporto di materiale in eccesso per poter recuperare, nelle fasi successive di lavorazione, le distorsioni termiche intrinseche del processo. Anche questa è una tecnica adeguata a parti primarie (ad alto carico) di strutture spaziali e si sta affinando per mitigare gli aspetti non ottimali sopra indicati.

Sebbene questa tecnologia non abbia ancora raggiunto la penetrazione industriale delle tecniche a letto di polvere, sono già disponibili sul mercato diversi processi di fusione di filo metallico, differenziantisi principalmente per la sorgente di energia utilizzata.

d) Processo di deposizione di filamento polimerico fuso (FDM/FFF)

È una tecnica in cui il filamento polimerico viene portato al punto di fusione mentre viene espulso dall'ugello di estrusione che procede depositando uno strato di spessore assegnato ad ogni passaggio della creazione del pezzo. È una tecnica di deposizione sostanzialmente lenta e di precisione non elevata (ordine del decimo) ma utilizza macchine poco costose e di facile gestione se confrontate con quelle basate su *laser*. A prescindere dalle proprietà base del materiale impiegato, le caratteristiche meccaniche dei pezzi così realizzati dipendono notevolmente dalla orientazione delle geometrie rispetto alla direzione di accrescimento per via della adesione tra gli strati e non permette valide finiture superficiali. La "facilità" di ottenimento dei pezzi è molto legata alle caratteristiche del materiale impiegato (in particolare per la fusibilità e per il comportamento in fase di raffreddamento) ed alla complessità delle geometrie da realizzare. Si presta anche a stampe di grandi dimensioni (anche ben oltre il metro). Ha una applicabilità di nicchia nella tipologia delle parti per applicazione spazio ma le ricorrenze potrebbero anche essere numericamente importanti se la proiettiamo nelle produzioni massive legate alle mega-costellazioni di satelliti. Per certo è la tecnica che presenta i minori costi complessivi per unità di prodotto (considerando le macchine e la logistica associata).

e) Processo di fusione selettiva di polveri polimeriche (SLS)

Rimanendo nell'ambito dei materiali non metallici molto interessante è la tecnica della fusione *laser* di polveri che possono essere sia polimeri *neat* (puri) che miscele tra polimeri di base ed altri materiali di drogaggio. Dispersioni di silice, alluminio, nano-tubi di carbonio o di grafene oppure di altri tipi di nano-particelle in grado di conferire proprietà particolari al pezzo finale. Questa tecnica coniuga le caratteristiche di una fusione precisa ed esente da rischi di adesione con gli svantaggi della stampa per letto di polveri (lentezza e limitazione dimensionale). Mediamente buone sono le precisioni dimensionali, i dettagli realizzativi, le prestazioni meccaniche e la rugosità superficiale, caratteristiche queste che estendono il campo delle applicazioni spazio ad una serie di piccole strutture terziarie ed a componenti più pregiati come, per esempio, parti per percorsi in radio-frequenza (RF) come guide d'onda, filtri, mixer, ecc.. Le problematiche connesse, fortemente dipendenti dal tipo di materiale impiegato, sono i possibili ritiri dimensionali, e gli svergolamenti. Il costo del pezzo, a parità di materiale (che comunque ne guida in modo importante il valore), è certamente superiore a quello delle tecniche a filamento fuso per via dei maggiori costi di acquisto e di esercizio dei macchinari.

f) Processi di sinterizzazione di materiali in polvere (Jet Binding)

Una categoria di processi particolari è quella della sinterizzazione dei materiali a partire da polveri che sono miscelate con un legante (*binder*) spruzzato localmente in micro gocce da una testa di stampa e suscettibile di una rapida solidificazione se esposto, per esempio, a una sorgente *laser*. Da questo processo si ottiene un semi-lavorato (cosiddetto "*green*"), avente le fattezze del prodotto finale che viene successivamente processato in forno per la eliminazione del legante. In questo modo il pezzo aumenta la purezza del materiale base fino ad oltre il 99% e assume quindi le proprietà chimico-fisico e geometriche finali. Per le sinterizzazioni si possono usare sia polve-

ri metalliche che ceramiche e il relativo risultato, fortemente legato alle purezze raggiunte, può essere di sorprendente valore. Questa tecnica, che garantisce livelli estremamente curati nei dettagli, trova applicazione per parti di piccole dimensioni (tipicamente entro un cubo di 200mm massimo) in cui i requisiti dominanti sono la complessità geometrica e la elevata finitura superficiale. Più di altre tecnologie AM, questa pone l'aspetto del controllo e predizione delle dimensione finali del pezzo in quanto il *de-binding* incide a livello volumetrico del pezzo. Aspetti peculiari di questa tecnica sono la possibilità usare metalli non saldabili e di mantenere inalterate, in assenza di processi di fusione, le caratteristiche dei materiali di base, motivo per cui questa tecnologia è la migliore candidata, tra l'altro, per lo sviluppo di "*smart part*".

g) Processi di deposizione per proiezione di materiali (Materials Jetting)

Una tecnologia di grande potenziale e trasversale a molti campi applicativi è quella della deposizione per proiezione di materiali di vario tipo contenuti in fluidi di base oppure no. In questo ultimo caso il materiale, finemente ridotto, è proiettato ad altissima velocità sul substrato esistente a cui aderisce per la deformazione plastica dell'impatto. Invece tra le svariate forme che usano un mezzo fluido scegliamo il caso degli inchiostri funzionalizzati applicabili su supporti di vario tipo.
Lo scopo, nell'uso di questi inchiostri, è quello di conferire alla parte particolari funzioni facendola diventare quindi uno "*smart object*". In questo ambito si può spaziare da rivestimenti più o meno estesi di inchiostri resi termicamente conduttivi, per conferire una funzionalità termica, a ambiti più squisitamente destinati a applicazioni elettriche/elettroniche, con l'utilizzo di inchiostri conduttivi elettricamente o magnetici. Le problematiche di queste tecniche sono la precisione geometrica delle deposizioni, il controllo degli spessori e la loro adesione al supporto in fase "operativa", quindi nel tempo ed alle condizioni di esercizio.

In conclusione, molte sono le tipologie di processo oggi esistenti a vari livelli di maturità e si intuisce il loro enorme potenziale. Inoltre le tecnologie dei processi si possono combinare con altre proprietà tipiche dell'AM quali, per esempio, il "*free-form*" o la possibilità di utilizzare materiali con caratteristiche variabili nelle varie zone di un oggetto. Il risultato ultimo può essere quindi sia la reinterpretazione ottimizzata o "*smart*" di oggetti oggi esistenti che, soprattutto, il concepimento di nuovi oggetti per funzioni completamente innovative.

19.3 LA FRONTIERA DEI MATERIALI

I materiali rappresentano il primo anello della filiera dell'*Additive Manufacturing*. La qualità e la stabilità delle loro caratteristiche chimico-fisiche è fondamentale nell'assicurare la riproducibilità e la affidabilità costante delle produzioni in tecnologia additiva e lo sarà ancora di più nell'approccio sistematico alle qualifiche di processo per le produzioni di massa. I materiali oltretutto costituiscono una frontiera a sé stante nell'ambito delle tecnologie di manifattura additiva, sia per i singoli processi a cui sono destinati che nel generare nuovi paradigmi realizzativi in sinergia con i processi additivi (es. stratificazioni multimateriale, misture di polveri "*ad hoc*", funzionalizzazioni tramite "drogaggi", ecc.). In questa sezione esamineremo i filoni di maggiore interesse e le prospettive future.

Materiali metallici

Negli ultimi anni il mercato della produzione additiva con materiali metallici è cresciuto ad un ritmo molto più elevato rispetto al mercato della produzione additiva nel suo complesso. A differenza delle stampanti 3D a base polimerica, quelle per metalli utilizzano in larga parte polveri metalliche, provenienti da industrie già esistenti, e non più filo metallico. Tuttavia, se si vuole produrre una polvere ad uso delle tecnologie additive, essa deve essere specificatamente progettata per tali applicazioni in modo che, ad esempio, la dimensione dei grani sia approssimativamente omogenea e compatibile con i vincoli imposti dalle macchine. Ciò significa che è possibile realizzare per processo additivo parti metalliche con lo stesso materiale utilizzato dalle attuali tecnologie di produzione tradizionali. Dunque, la stampa 3D in metallo è la linea di confine tra presente e futuro della produzione industriale. D'altra parte il processo di stampa 3D, che di fatto realizza una fusione istantanea di metallo ridotto in finissima polvere, introduce in aggiunta ai classici aspetti della metallurgia anche nuovi potenziali problemi e fonti di errore, tra cui porosità, carenza di fusione, micro-cricche, stress residui e deformazioni locali. Come regola generale, se un metallo è facilmente saldabile, allora offre buone garanzie di processabilità con la tecnologia additiva. Esiste già una vasta gamma di metalli base e relative leghe che possono essere stampati in 3D, sia come polvere che in filo. Questi includono, in un approssimativo ordine di maturità e diffusione di impiego, i seguenti tipi: acciai vari (base da costruzione, inossidabile, alte prestazioni, per utensili, ecc.), alluminio (varie leghe), titanio (due leghe principali), inconel e nichel. Più di nicchia, troviamo il rame, il cobalto, i metalli preziosi, il tantalio e il tungsteno. I principali materiali utilizzati per le applicazioni aerospaziali sono le leghe di titanio, le leghe di alluminio (di preminente impiego in campo strettamente spaziale) e vari tipi di acciai. Tuttavia, la tecnologia della "produzione additiva" ha aperto nuove frontiere nel settore dei materiali che vengono progettati specificatamente per questo ambito applicativo: gli obiettivi sono sia quello di migliorare i classici parametri del-

le prestazioni termo-meccaniche (rigidezza, resistenza, durezza, resistenza a fatica, basso CTE, ecc.) ma anche quello di garantire sia una buona stampabilità (al fine di ridurre il rischio di difetto nei pezzi) che una adeguata lavorabilità del materiale stampato. Inoltre, la comunità scientifica sta esplorando le nuove frontiere del "drogaggio" dei prestazioni ottime su determinati parametri, nell'ottica funzionale del pezzo da realizzare.

a) Produzione additiva con titanio

Il titanio è uno dei materiali più usati per la manifattura 3D, in particolare per applicazioni aerospaziali e mediche (es. protesi ossee). A metà tra l'alluminio e l'acciaio per le prestazioni meccaniche specifiche, esso è chimicamente inerte e quindi risulta biocompatibile. Questi aspetti positivi sono però in parte sminuiti dal suo costo relativamente elevato. Il suo impiego ha quindi trovato in chiave additiva un nuovo impulso visto l'uso molto efficiente del materiale a confronto degli sprechi connessi alle produzioni tradizionali di tipo sottrattivo (asportazione di truciolo). Prova ne sia l'approccio validato dalla società norvegese Norsk Titanium nel realizzare tramite AM preforme in titanio che riprendono sostanzialmente la geometria del pezzo finale con un leggero sovrametallo da rimuovere per la finalizzazione dello stesso. Questo rende efficiente la produzione in termini di tempi e costi ma ovvia anche alle problematiche di reperimento di formati in titanio di elevato spessore. Il titanio in polvere è piroforico e reagisce in modo esplosivo con acqua a temperature superiori a 700° C. Per questo motivo, la polvere di titanio deve essere stampata sottovuoto o in ambiente inerte (es. gas argon). È anche possibile stampare in 3D utilizzando come principio la fusione di un filo di titanio realizzata da un fascio di elettroni (EBM), eliminando così il rischio di una reazione esplosiva. Le due leghe di titanio più comuni utilizzate nella produzione additiva sono Ti6Al4V e Ti6Al4V ELI.

b) Stampa 3D con alluminio

L'alluminio è un metallo leggero e versatile che può essere utilizzato per la stampa 3D di componenti aerospaziali e parti per il settore "*motor-racing*", tanto moto che auto. Sebbene non sia resistente come l'acciaio, l'alluminio è molto più leggero e meno soggetto alla corrosione in generale (anche se sensibile allo *Stress Corrosion Cracking*). È più costoso dell'acciaio ma meno del titanio. Il più grande vantaggio offerto dall'alluminio per la stampa 3D è la possibilità di produrre parti con dettagli precisi e pareti sottili, fino a 50 micron. Le parti in alluminio realizzate con la produzione additiva tendono ad avere una superficie rugosa e opaca differente quindi dalla finitura liscia e lucente tipica della superficie fresata dell'alluminio lavorato per asportazione di truciolo. Le leghe di alluminio più comunemente utilizzate per la stampa 3D sono AlSi7Mg e AlSi10Mg.

c) Produzione additiva con acciaio inossidabile

Rispetto all'alluminio, al titanio e alla maggior parte degli altri metalli sopra citati, l'acciaio inossidabile è di gran lunga l'opzione più economica. Può essere utilizzato per la stampa 3D di parti a cui si richiede alta resistenza meccanica e alla corrosione per l'utilizzo in ambienti estremi, come motori a reazione e razzi. Uno studio sviluppato da Renishaw indica che il processo AM possa for-

nire leghe di acciaio ad alta resistenza rispetto al materiale prodotto con tecnologie convenzionali, arrivando in alcune applicazioni ad una resistenza alla trazione anche superiore a 600 MPa. Infine, le parti in acciaio inossidabile possono essere stampate in 3D utilizzando la tecnica della deposizione diretta di metallo (LMD, *Laser Melting Deposition*) e possono anche essere placcate con altri metalli per cambiare il loro aspetto e/o le loro proprietà superficiali. Gli acciai inossidabili più comunemente utilizzati nella produzione additiva sono 17-4PH, 15-5-PH, ASM 316L e 304L.

d) Leghe progettate ad hoc per applicazioni AM

In proiezione futura suscita sempre maggiore interesse "l'*alloy design*", ovvero la possibilità di progettare leghe *ad hoc* per applicazioni AM. La progettazione di leghe per AM di composizioni innovative è supportata mediante un approccio modellistico che prevede l'utilizzo di codici di calcolo termodinamico e cinetico per ottimizzare la microstruttura e la distribuzione di fasi in relazione alle proprietà di impiego. In altre parole, l'obiettivo è quello di definire composizioni processabili per AM tali da assicurare caratteristiche meccaniche, di resistenza a corrosione/ossidazione e più in generale di garantire prestazioni ingegneristiche idonee all'impiego individuato. Combinando i vantaggi della stampa 3D metallica con la scelta di nuovi materiali si può ampliare notevolmente le caratteristiche funzionali e le prestazioni dei componenti moderni. Un esempio concreto di lega sviluppata specificamente per processi di manifattura additiva è lo Scalmalloy®, ovvero una lega di alluminio, magnesio e scandio che offre una duttilità molto alta (paragonabile a quella delle leghe di Titanio) ma con la leggerezza tipica delle leghe di Alluminio (densità 2.67 g/cm3). Il materiale Scalmalloy® è stato progettato per essere lavorato utilizzando processi di produzione a letto di polveri. A causa dell'elevata velocità di raffreddamento e della rapida solidificazione, si ottiene una microstruttura unica, le cui prestazioni sono comparabili con prodotti di fonderia di alluminio di altissima qualità. Ulteriori esempi di leghe sviluppate *ad hoc* per processi additivi, che stanno trovando un impiego significativo nell'industria aerospaziale, riguardano i composti intermetallici base Ti ed in particolare gli Alluminuri di Titanio (TiAl). Essi offrono eccellenti proprietà meccaniche e resistenza all'ossidazione e alla corrosione a temperatura elevata (sopra 600 °C), e possono quindi sostituire le tradizionali superleghe a base di nichel nei motori a turbina degli aerei. In particolare, il loro utilizzo riguarda le pale delle turbine a bassa pressione dei motori e le pale dei compressori ad alta pressione. Tradizionalmente, queste parti sono fatte con superleghe a base di nichel, che hanno una densità quasi doppia rispetto a leghe a base di TiAl.

2. Materiali Termoplastici

Il mercato dei materiali per la produzione additiva di materiali termoplastici o polimerici ha tratto beneficio dai progressi e dalle innovazioni nel settore dello stampaggio ad iniezione. Inoltre, recentemente è stato introdotto anche nell'ambito della stampa additiva un materiale che è già popolare nelle industrie di processo automobilistico, medico, aerospaziale e chimico: questo è il PEEK (Poli-Etere Etere Chetone) per la sua buona resistenza meccanica e all'urto, la durabilità, la alta temperatura di fusione (oltre i 300 °C) e l'approvazione della FDA per il contatto con il cibo. L'elenco dei materiali polimerici 3D-stampabili è anche più lungo di quello per i metalli e qui sono riportati alcuni dei più popolari: Acetale, Acrilico, Acrilonitrile-butadiene stirene (ABS), Acrilato di

acrilonitrile-stirene (ASA), Polistirolo ad alto impatto (HIPS), Nylon, Policarbonato (PC), Polietere etere chetone (PEEK), Tereftalato di polietilene (PET), Polietilene trimetilen tereftalato (PETTIne), Polietilene Terephthalate glicole-modificato (PETG), Acido polilattico (PLA), PoliPropilene (PP), Alcol polivinilico (PVA), Elastomero termoplastico (TPE) e ULTEM. I materiali polimerici più utilizzati sono l'ABS, il Nylon ed il Policarbonato, di cui si approfondiscono qui appresso le caratteristiche:
a) Produzione additiva con acrilonitrile-butadiene stirene (ABS)
L'ABS è il materiale che dopo il PLA, largamente popolare, risulta di larghissima diffusione nelle applicazioni di stampa 3D combinando una buona stampabilità con caratteristiche meccaniche migliori del PLA ed un basso costo. L'ABS deve essere riscaldato ad una temperatura relativamente alta di 230-250 °C per essere utilizzato in una stampante 3D, inoltre richiede generalmente una piastra riscaldata per l'appoggio della stampa al fine di garantire una giusta temperatura che impedisca le tensioni residue nel pezzo. Questo materiale può essere usato con varie tecnologie tra cui deposizione di filamento fuso (FDM o FFF), *Jetting* del legante, stereolitografia (SLA) o poli*jetting*. Il principale svantaggio dell'ABS è il fatto di emettere fumi tossici al suo punto di fusione.

b) Stampa 3D con nylon

Il nylon, conosciuto genericamente come poliammide, è un polimero sintetico che offre più resistenza dell'ABS ad un costo maggiore. È anche flessibile e dimostra un'eccellente di memoria di forma. L'aderenza dello strato per le parti stampate 3D fatte con nylon è inoltre superiore alla media.

Per la sua sensibilità all'umidità la stampa con questo materiale deve avvenire in vuoto o in ambiente a temperature elevate e richiede una sua appropriata conservazione. Il nylon è soggetto a ritiro cosa lo che rende le stampe meno accurate rispetto a quelle in ABS. I tipi più popolari di nylon per la fabbricazione dell'additivo sono il Taulman 618 e 645.

c) Produzione additiva con policarbonato (PC)

La plastica policarbonato (PC), anche conosciuta sotto il nome commerciale Lexan, è sia chiara che densa, con resistenza alla trazione eccellente. La sua trasparenza permette al PC di essere utilizzato in una varietà di applicazioni, compresi gli occhiali da sole. Il PC rinforzato con carbonio può essere utilizzato per creare collettori di aspirazione e altre parti soggette ad alte temperature.
Il PC è solubile in diclorometano e fonde in un campo di temperature tra 260 e 300°C, abbastanza alto per la stampa 3D. Anche se è naturalmente trasparente, il PC può essere colorato. Come per l'ABS, è necessario un piano di stampa riscaldato per garantire l'aderenza del pezzo e ridurre il rischio di distorsioni.

3. Materiali ceramici e vetro

La ceramica e il vetro sono sempre più utilizzati nella produzione additiva poiché i ricercatori stanno risolvendo le sfide legate alla lavorazione di questi materiali a temperature molto elevate. La prospettiva di creare parti in ceramica e vetro geometricamente complesse attira coloro che operano in aree anche molto disparate come l'aerospazio e l'arte.

a) Produzione additiva con materiali ceramici

Le produzioni basate su processi additivi utilizzanti ceramiche al carburo di silicio (SiC) hanno un avvio più rapido e mediamente meno costoso (soprattutto per le piccole-medie serie) in parte perché si elimina il passaggio degli stampi. Parti ceramiche geometricamente complesse offrono prestazioni migliori con meno peso, proprietà molto interessanti per i produttori di motori a reazione e motori a razzo. Esempi di produzioni commercialmente redditizie sono già in corso utilizzando vari processi di AM tra cui il *binder jetting*, l'estrusione di materiale e la stereolitografia. Ad esempio, oggetti di porcellana finemente dettagliati vengono creati tramite stereolitografia per deposizione: una pasta, costituita da un foto-polimero miscelato con polvere ceramica in sospensione acquosa, viene estrusa in piccola quantità da un ugello e polimerizzata tramite luce UV. La successiva "cottura" e la smaltatura completano il processo.

Il processo produce parti in ceramica con la qualità di uno stampo ad iniezione ma permettendo forme più complesse che possono prevedere anche cavità e sottosquadri particolari. In generale, la stampa 3D ceramica sta rapidamente evolvendo dalla produzione a breve termine di componenti specializzati alla produzione in serie di prodotti personalizzati.

b) Produzione additiva con vetro

Nella sinterizzazione *laser* selettiva (SLS), la polvere di vetro viene parzialmente fusa dai *laser* per creare oggetti 3D utili nella progettazione architettonica e di prodotto. Ci possono essere anche applicazioni per vetri stampati in 3D nel campo dell'optoelettronica. Il vetro otticamente trasparente stampato in 3D richiede una lavorazione ad alta temperatura della polvere di vetro in un prodotto che viene poi ricotto. Per creare con successo oggetti in vetro utilizzando la produzione additiva, è necessario controllare con precisione viscosità, velocità di avanzamento, spessore dello strato, portata e adesione.

Il MIT ha sviluppato un processo in cui materiale viene estruso attraverso un ugello ceramico portato ad elevatissime temperature assumendo la consistenza del miele fuso.

La produzione additiva di parti in vetro otticamente trasparente può aprire ad applicazioni tecnologiche completamente nuove. Alcuni ricercatori prevedono la possibilità che le fibre ottiche siano incorporate direttamente nelle facciate di edifici in vetro stampato.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Le ragioni per lo sviluppo della tecnologia di fabbricazione additiva sono veramente molteplici e certamente più estese e profonde della sua specifica applicazione nell'ambito spaziale dove, per quanto visto, può comunque esprimere "leve" importanti. In una descrizione molto sintetica dei vari punti possiamo innanzitutto considerare i due filoni principali (peraltro tra loro strettamente connessi) della **tecnologia di produzione** e della **tecnologia al servizio della scienza e dell'innovazione tecnologica**, in una sorta di filone "autoportante". È indiscutibile che, relativamente al primo aspetto, la valenza industriale diventerà vieppiù importante basandosi su aspetti oggi cruciali come il divario tecnologico, l'efficienza di produzione, il "*re-shoring*" in chiave tecnologica delle produzioni, con i conseguenti aspetti sociali e logistici (es. trasporti su scala globale).

Motore di questi aspetti è certamente il tema della **Fabbrica 4.0** di cui la tecnologia additiva fa

parte integrante in qualità di "terminale esecutivo" di un processo completamente digitale. In questo specifico ambito l'AM si pone , come supporto già nella fase iniziale di un nuovo *design*, con la prototipazione veloce per la verifica funzionale di quanto concepito.
Poi la capacità di un rapido ed economico processo di "affinamento" del design del pezzo con la sua validazione sul campo piuttosto che lunghe e costose fasi di modellazione ed analisi, fanno dell'AM una tecnologia determinante per la riuscita soprattutto quando il pezzo in questione è inserito in ambienti critici o è pensato per funzioni difficili da simulare in modo affidabile.
Inoltre, tempi e costi che precedentemente erano destinati alla realizzazione di stampi sono oggi sostanzialmente annullati. Eventuali piccoli dettagli funzionali non perfettamente colti nella prima concezione o connessi alla evoluzione del pezzo stesso, possono essere introdotti senza gli impatti di costi e di tempi normalmente associati al rifacimento della documentazione tecnica ed alla modifica delle attrezzature di produzione.
La seguente fase di produzione, che si avvarrà sempre più di materiali e processi pensati per la riduzione dei tempi e per il consolidamento della affidabilità di stampa, trarrà vantaggio delle efficienze intrinseche della tecnologia AM per il minore impatto sia sulle materie prime per trasporto, movimentazione, generazione/gestione scarti che per la minore richiesta energetica complessiva.
Nelle fase di produzione, per le tipologie di prodotto interessate (e si può ipotizzare a maggiore valore aggiunto), si potranno più proficuamente impostare processi "*on-demand*" e con forte delocalizzazione con significativi e positivi impatti sia sulla logistica che sulla riduzione dell'immobilizzo di valore associato ai magazzini che potrebbero virtualmente essere annullati. Inoltre il facile "*customizing*" degli oggetti aprirà, a costi aggiuntivi praticamente nulli, nuovi orizzonti commerciali associati ai trends di sviluppo, di competitività e di moda dominanti nei relativi settori.
In una relazione di mutua alimentazione si può ipotizzare che, nel giro di una decade, il "*break-even point*" tra metodi di produzione tradizionale e produzione additiva si sposti sempre più a favore di quest'ultima ed i settori trainanti di oggi (*motor-racing*, aerospazio, e medicale, tra i principali) consolideranno il loro *trend* applicativo in chiave AM e saranno affiancati da altri di maggiore rilevanza in termini di fatturato.
Ma, mentre nella fase di produzione la tecnologia AM diventerà dominante su determinati filoni applicativi, in quello della ricerca industriale l'AM sarà di grande supporto soprattutto negli ambiti in cui è ancora in forte espansione e, in taluni casi, anche nella ricerca di base. Infatti, mostrando tutta la sua "dualità" in equilibrio tra tecnologia di produzione e tecnologia di ricerca, l'AM sarà sempre più utilizzato in questo ultimo ambito.
La possibilità di depositare secondo forme "esotiche" materiali aventi caratteristiche chimico-fisiche diverse oppure variabili da punto a punto, così come la possibilità di combinare due diverse tecnologie di stampa in un unico processo realizzativo, sono solo alcuni dei temi portanti della ricerca industriale.
Gli obiettivi sono la realizzazione di parti multi-funzionalizzate, gli "*smart-objects*", che sono il fulcro del filone emergente e rivoluzionario dell'*Internet of Things* (IoT). Poter combinare "*one-shot*", fin dalla sua realizzazione, oltre alle proprietà geometrico-fisiche classiche di un oggetto, anche determinate proprietà elettriche (es. in Figura 19.8) o magnetiche in specifiche zone più o meno

ampie, apre ad un mondo di possibili applicazioni intelligenti e di interazioni tra oggetti e tra questi e l'uomo.

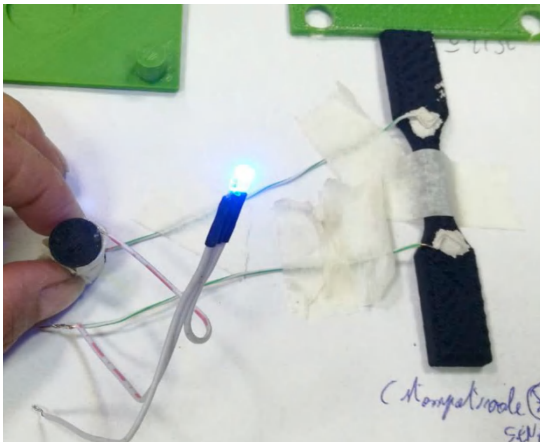


FIG. 19.8 PROVA DI LABORATORIO DI POLIMERO RESO ELETTRICAMENTE CONDUTTIVO (CREDIT GRUPPO SCIENZA E TECNOL. DEI MATERIALI, DIP.TO ING. DELL'IMPRESA UNIV. ROMA TOR VERGATA)

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Comprendere come un dominio tecnologico si sia evoluto, quali sono gli attori coinvolti e come la conoscenza tecnologica sia distribuita dal punto di vista geografico – ad es., comprendere lo **stato dell'arte** di un dominio tecnologico - si è rivelato particolarmente utile per meglio definire le future attività di ricerca e sviluppo (R&S) e supportare l'attività di *policy making* in diversi ambiti. In linea con queste evidenze, si presenta lo stato dell'arte del dominio *Additive Manufacturing*. Per tale scopo, si è voluto ricorrere all'**analisi dei brevetti** relativi a tale dominio. I dati brevettuali sono infatti ampiamente riconosciuti come *proxy* per mappare la evoluzione tecnologica in un dato dominio tecnologico. Si sono dunque collezionati tutti i brevetti - insieme alle loro informazioni bibliografiche - che fanno riferimento al dominio *Additive Manufacturing*. Il database utilizzato per la raccolta dei brevetti è Orbis (Bureau van Dijk), il quale contiene informazioni di oltre cinquanta milioni di brevetti registrati nel mondo. Il campione finale individuato include **8.061 brevetti**.

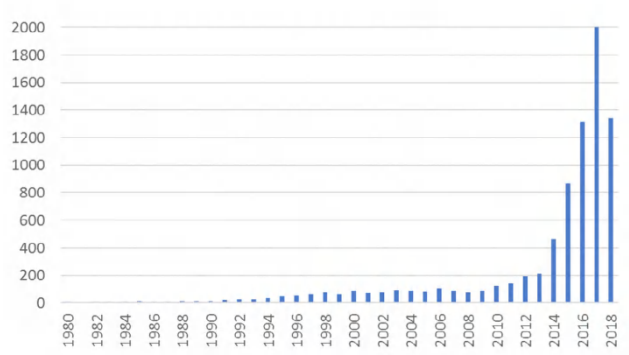


FIG. 19.9A NUMERO DI BREVETTI PER ANNO

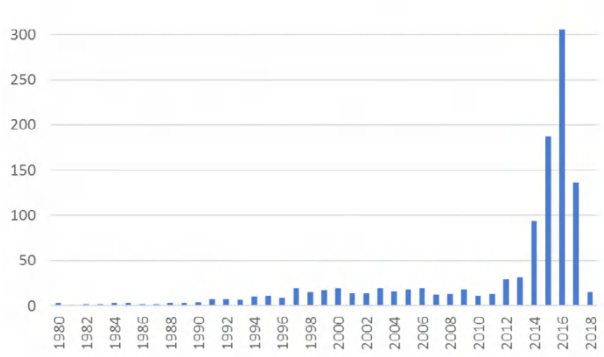


FIG. 19.9B. NUMERO DI BREVETTI A MAGGIORE IMPATTO (TOP 10%) PER ANNO

La Figura 19.9a mostra il numero di brevetti per anno di pubblicazione. Si può notare come la maggior parte dei brevetti relativi il dominio *Additive Manufacturing* sia concentrata nel periodo 2014-2018. Sebbene la rilevanza dell'*Additive Manufacturing* sia emersa in particolare negli ultimi anni, giustificando il risultato di cui sopra, l'interesse verso tale dominio appare comunque avere oltre un trentennio. La Figura 19.9b restringe l'analisi temporale ai soli brevetti che hanno avuto maggiore impatto sul progresso del dominio in esame (top 10%). In altre parole, considera i brevetti che sono stati maggiormente citati da brevetti sviluppati successivamente rispetto alla media di citazioni di tutti gli altri brevetti registrati nel medesimo anno. Il *trend* mostrato dalla figura sottolinea la rilevanza degli ultimi anni non solo in termini di sviluppo tecnologico in generale, ma anche di sviluppo di tecnologie particolarmente rilevanti per le successive attività di R&S nel settore dell'*Additive Manufacturing*.

La Figura 19.10 mira ad approfondire l'andamento temporale dell'attività di R&S italiana nel dominio *Additive Manufacturing*. La figura mostra che, salvo due eccezioni, la totalità dei brevetti è registrata tra il 2013 e il 2018. Non si può quindi considerare l'Italia tra i pionieri dell'*Additive Manufacturing*, avendo mostrato solo un recente interesse in tale dominio, probabilmente legato alla recente rivoluzione Industria 4.0 e alle relative politiche industriali.

La Figura 19.11 analizza, in particolare, come la conoscenza del dominio *Additive Manufacturing* risulti dispersa dal punto di vista geografico andando a considerare il paese di prima applicazione dei brevetti. La Cina risulta essere l'area geografica primaria in cui i brevetti vengono depositati, suggerendo quindi una forte intensità di R&S in questa area. Quasi il 60% di tutti i brevetti possono infatti essere considerati di origine cinese. Risulta anche rilevante che negli Stati Uniti d'America (USA) si siano brevettate meno della metà delle tecnologie *Additive Manufacturing* rispetto alla Cina. Un modesto contributo può essere attribuito a Giappone e Korea del Sud. La R&S italiana, invece, ha contributo allo sviluppo del dominio *Additive Manufacturing* per soli 71 brevetti su 8061 (0,88% del totale). Uno scenario simile (non riportato) lo si ha limitando il *focus* sui brevetti a elevato impatto, anche se il divario tra USA e Cina risulta sensibilmente ridimensionato.

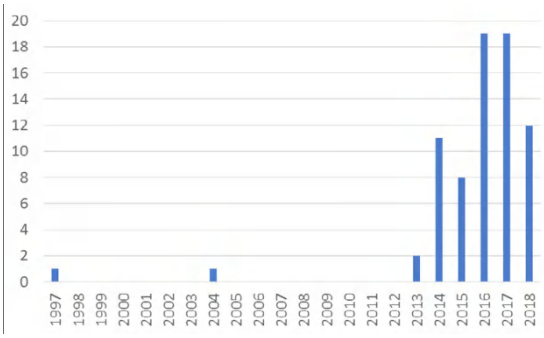


FIG. 19.10 NUMERO DI BREVETTI PER ANNO PER L'ITALIA

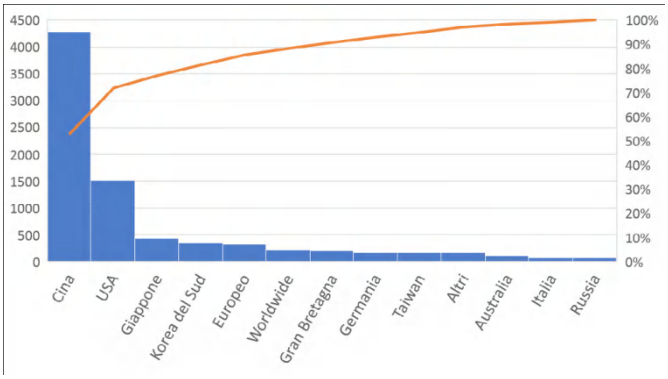


FIG. 19.11 NUMERO DI BREVETTI PER PAESE DI PRIMA APPLICAZIONE

Dato che il dominio dell'*Additive Manufacturing* può includere diverse aree tecnologiche, si è analizzata la distribuzione dei brevetti individuati tra le diverse aree individuate dalla classificazione internazionale dei brevetti (IPC). La Figura 19.12 mostra che l'80% dei brevetti rientra in dodici differenti aree. Alcune di queste fanno specifico riferimento alle aree legate al *manufactu-*

ring e trattamento dei materiali. Altre sono più distanti e fanno riferimento a processi chimici ed elettrici, o all'ambito medicale.

La stessa analisi, condotta sui soli brevetti italiani, evidenzia che questi si distribuiscono su sole sei aree. Tra queste "*working of plastics; working of substances in a plastic state in general*" rappresenta la principale area di competenza, racchiudendo l'80% dei brevetti italiani. Tra le aree rimanenti, l'area "*machines or engines in general; engine plants in general; steam engines*" (3%) non rientra tra le 12 aree chiave del campione totale. Potrebbe, pertanto, costituire una nicchia nella quale l'Italia potrebbe focalizzare la sua attività, arrivando quindi a rivestire un ruolo rilevante a livello internazionale.

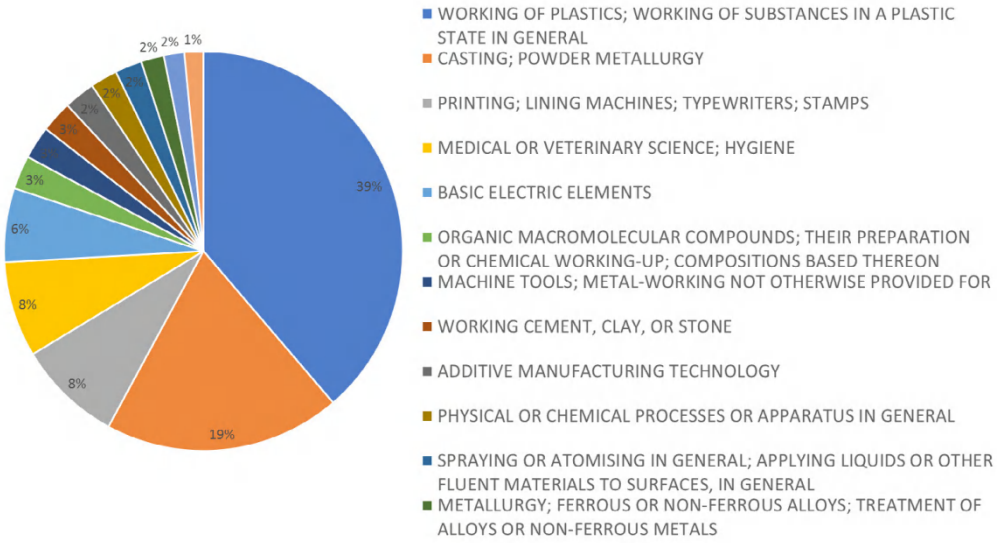


FIG. 19.12 DISTRIBUZIONE DEI BREVETTI (80%) PER CLASSIFICAZIONE INTERNAZIONALE (IPC)

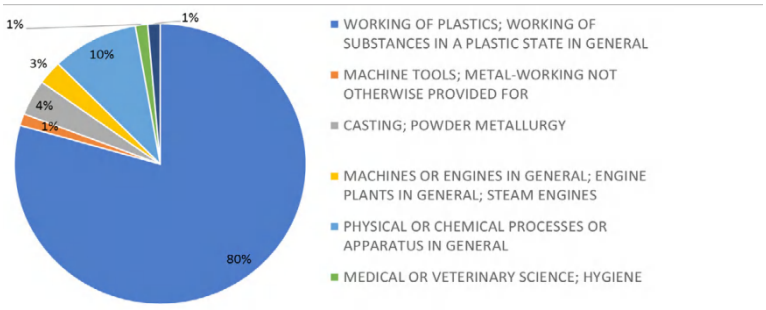


FIG. 19.13 DISTRIBUZIONE DEI BREVETTI ITALIANI PER CLASSIFICAZIONE INTERNAZIONALE (IPC)

La Tabella 19.1a mostra le principali organizzazioni (top 10) coinvolte nello sviluppo dei brevetti analizzati. Nonostante alla Cina risulti associato il maggior numero di brevetti, le prime tre organizzazioni sono statunitensi.

TAB. 19.1A TOP 20 ORGANIZZAZIONI PER NUMERO DI BREVETTI

ORGANIZZAZIONE	PAESE	BREVETTI	MEDIA CITAZ.
3D SYSTEMS INC.	USA	158	45,82
STRATASYS INC.	USA	85	12,10
EASTMAN KODAK COMPANY	USA	78	44,44
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY	CN	65	0,05
DWS S.R.L.	IT	56	0,48
XYZPRINTING INC.	USA	51	0,20
NINGXIA KOCEL MOULD LTD.	CN	50	0,98
INSTITUTE OF CHEMISTRY CHINESE ACADEMY OF SCIENCES	CN	50	0,02
GENERAL ELECTRIC COMPANY	USA	49	0,90
CHINA CONSTRUCTION EIGHTH ENGIN. DIVISION LTD.	CN	41	0,15

TAB. 19.1B TOP 20 ORGANIZZAZIONI PER NUMERO DI BREVETTI A MAGGIORE IMPATTO

ORGANIZZAZIONE	PAESE	BREVETTI
3D SYSTEMS INC.	USA	59
STRATASYS INC.	USA	28
EASTMAN KODAK COMPANY	USA	22
NINGXIA KOCEL MOULD LTD.	CN	19
SILVERBROOK RESEARCH LTD.	AU	19
SHANGHAI CONSTRUCTION GROUP	CN	13
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY	CN	11
VELO3D INC.	USA	11
DTM CORPORATION	USA	10
MICRON TECHNOLOGY INC.	USA	9

Questo dato suggerisce come la R&S nel dominio *Additive Manufacturing* in Cina sia distribuita tra molteplici attori, differentemente da quanto accade negli USA. Per l'Italia, la DWS s.r.l. rientra nella top 10 delle organizzazioni più rilevanti. Le altre organizzazioni italiane sono mostrate in Tabella 19.2a. È interessante anche notare come nella top 10 delle organizzazioni più produttive, anche di tecnologie a maggiore impatto (Tabella 19.1b), rientrino delle università, suggerendo il ruolo chiave che queste hanno insieme al mondo dell'impresa.

TAB. 19.2A ORGANIZZAZIONI ITALIANE

ORGANIZZAZIONE	BREVETTI	MEDIA CITAZ.
DWS S.R.L.	56	0,48
AVIO	6	0
NUOVO PIGNONE S.R.L.	4	0,25
NYLTECH ITALIA S.R.L.	2	0
ST MICROELECTRONICS S.R.L.	2	0
SIPA S.P.A.	1	0
SNIARICERCHE S.C.P.A.	1	0

TAB. 19.2B ORGANIZZAZIONI ITALIANE CHE POSSIEDONO BREVETTI A MAGGIORE IMPATTO

ORGANIZZAZIONE	BREVETTI
DWS S.R.L.	2
NUOVO PIGNONE S.R.L.	1

Considerando la media delle citazioni ricevute dai rispettivi brevetti, le prime tre organizzazioni statunitensi hanno maggiormente favorito lo sviluppo del dominio *Additive Manufacturing* come corroborato dalla Tabella 19.1b, la quale vede le stesse tre organizzazioni come detentrici del maggior numero di brevetti a più alto impatto. Nel contesto italiano, solo DWS s.r.l. e NUOVO PIGNONE s.r.l. sono proprietarie di brevetti a elevato impatto (Tabella 19.2b). Quindi, è probabile che i brevetti italiani siano di natura più **incrementale**, suggerendo che la R&S italiana sia volta prevalentemente al *catch-up* tecnologico piuttosto che allo sviluppo del dominio in esame.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 20

TECNOLOGIE FLESSIBILI DI TELECOMUNICAZIONE PER COLMARE IL DIVARIO DIGITALE E PER APPLICAZIONI GOVERNATIVE

L'iniziativa europea **GOVSATCOM** risponde alla crescente necessità di **comunicazioni sicure** per applicazioni *critiche* in ambito ***governativo/istituzionale*** quali la *gestione delle crisi*, la *sicurezza marittima*, la *sorveglianza dei confini*, lo *scambio tra enti di dati sensibili* come pure applicazioni orientate al miglioramento della qualità della vita come *il tele-soccorso, la tele-medicina, la tele-education*. Per raggiungere l'obiettivo l'UE, in collaborazione con l'ESA in sintonia con le Agenzie Nazionali, ha avviato l'iniziativa EU-GOVSATCOM per l'implementazione di sistemi e reti satellitari innovative e sicure a supporto di tali tipologie di servizio.

Risulta evidente come la comunicazione sicura per applicazioni critiche debba essere supportata e guidata da un elevatissimo grado di innovazione tecnologica poiché è proprio l'innovazione tecnologica che determina implicitamente la "sicurezza" ed in tal senso l'ambito spazio, dove tecnologie innovative si affermano a supporto di infrastrutture e servizi sempre più eterogenei e complessi, trova la sua naturale collocazione sia nell'asse della "innovazione" che in quello della "sicurezza".

Si può infatti rilevare come i sistemi satellitari stiano evolvendo da un approccio applicativo di tipo segregato o di "nicchia" (singolo satellite o piccole costellazioni focalizzate su applicazioni e servizi specifici per il cliente finale) a un concetto di *rete estesa*, complessa, che coinvolge diversi *sistemi satellitari tra loro interconnessi* (costellazioni di satellite nella stessa orbita o inter-orbita) a loro volta connessi con reti terrestri in configurazione integrata e in modo trasparente per l'utente finale, come si declina nel perimetro di telecomunicazioni cosiddetto "5G".

Tale **integrazione terra-satellite** impone la necessità di adeguate prestazioni almeno simili a quelle delle reti puramente terrestri (alto bitrate, utilizzo di connettività ottica come quella utilizzata con le fibre ottiche ed altro) e su cui il tema della *sicurezza informatica* diventa di estrema criticità ed interesse: le reti di accesso satellitare, come sviluppate in ambito GOVSATCOM, avranno caratteristica di notevole robustezza, flessibilità e soprattutto sicurezza nell'accesso alle informazioni.

In Figura 20.1 è rappresentato in maniera pittorica il concetto di rete estesa ed interconnessa su descritta.

Questa nuova frontiera rappresenta una opportunità unica per la filiera italiana di alta tecnologia, industriale e di servizi, chiamata a realizzare sistemi e supportare servizi ad elevatissimo valore innovativo per il "cittadino europeo". Tutto ciò s'inquadra all'interno dell'Agenda Digitale Europea (ADE) definita dall'UE e dell'Agenda Digitale Italiana (ADI) stabilita dal Governo Italiano nel 2012 identificando come priorità di intervento il superamento del divario digitale (*Digital Divide*) per la promozione e lo sviluppo dei servizi digitali e la realizzazione di una rete di telecomunicazione governativa ad elevato *standard* di sicurezza anche contro attacchi informatici.

Il *target* è quindi la realizzazione di una infrastruttura di telecomunicazioni che fornisca una *connettività* a **banda ultra-larga** (cioè con velocita di trasferimento dati superiore a 30Mb/s e con obiettivo finale di 100Mb/s) con copertura *regionale/europea* e *mediterranea*, caratterizzata da standard di protezione della comunicazione al di sopra di quanto oggi è allo stato dell'arte in ambito commerciale. Questo viene considerato un elemento strategico fondamentale per il Sistema Paese in quanto consente di *distribuire* l'ambiente digitale governativo/istituzionale ovunque, a tutti e in modo sicuro.

Al fine di raggiungere questo obiettivo sulla totalità del territorio nazionale e per la totalità della popolazione, la complementazione delle *reti di telecomunicazione terrestri,* fisse e mobili, con quelle di *telecomunicazioni satellitari* (SATCOM *System Infrastructure*) ad elevato grado di flessibilità e sicurezza, è considerata un fattore chiave per il Paese, in grado di consentirgli sintonia con quanto già si sta facendo in ambito Europeo e Mondiale.

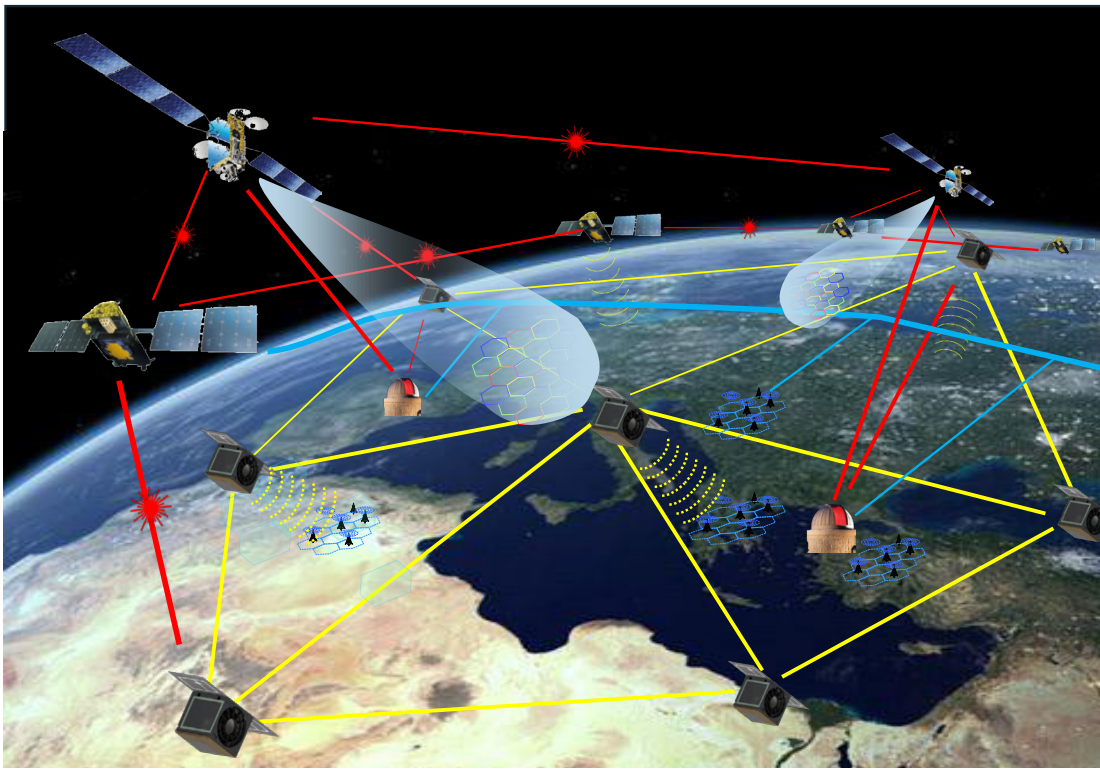


FIG. 20.1 RAPPRESENTAZIONE DI RETE INTERCONNESSA TRA SATELLITE E RETI TERRESTRI CON TECNOLOGIA ANCHE OTTICA (CREDIT THALES ALENIA SPACE)

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Le innovazioni richieste per implementare quanto descritto nel precedente paragrafo, motivano i molteplici sviluppi tecnologici che coprono diversi settori caratterizzanti i sistemi satellitari di te-

lecomunicazioni completi (SATCOM *end-to-end system*). Le elevate prestazioni richieste all'infrastruttura SATCOM, sia in termini di velocità di scambio dati che di capacità complessiva, inducono necessariamente all'impiego di nuove bande di frequenza poste sulla parte più alta dello spettro elettromagnetico radio utilizzato per le telecomunicazioni satellitari, in particolare le bande K/Ka (K: 18–27GHz; Ka: 27-40GHz) e Q/V (Q: 36–46GHz; V: 46–56GHz). D'altro lato è richiesta una notevole *flessibilità* e *configurabilità* a bordo satellite sia per poterlo gestire in maniera dinamica, sia per implementare opportuni sistemi e algoritmi atti a garantire la sicurezza informatica sul traffico dei dati. Tutto ciò richiede una capacità di "*processing on-board*" molto più evoluta di quanto attualmente disponibile.

Se, da un lato, l'impiego delle bande K/Ka per il collegamento d'utente è una scelta ampiamente condivisa, considerando anche la disponibilità sul mercato già da alcuni anni di terminali d'utente commerciali (in gergo COTS ovvero "*commercial-off-the-shelf*") su tali bande, dall'altro lato l'utilizzo in ambito operativo cioè non più sperimentale di bande innovative, ad esempio la banda Q/V o l'ottico, risulta una scelta vantaggiosa decongestionando la banda K/Ka in modo da dare più capacità agli utenti finali e riducendo il numero di *Gateway* aumentando la banda/capacità di ciascuna *Gateway*.

L'utilizzo di protocolli di comunicazione standard come DVB-S/RCS e la loro evoluzione DVBS2X/RCS2 permettono, inoltre, collegamenti in cui l'efficienza spettrale (rapporto tra capacità di trasmissione in *bit/s* e banda utilizzata in Hz, ovvero utilizzo dell'energia per il *link* ottimizzato) venga dinamicamente ottimizzata garantendo allo stesso tempo una potenziale elevata penetrazione nei mercati di massa.

Scelte innovative del sistema di Telecomunicazione richiedono l'acquisizione e lo sviluppo di tecnologie di bordo che rendano il segmento spaziale possibile sia da un punto di vista tecnico che da un punto di vista di sostenibilità economica.

Tecniche di processamento digitale di segnale a bordo, sistemi d'antenna flessibili multi-spot, tecniche di flessibilità della ripartizione della potenza e della capacità, elevate prestazioni di EIRP e G/T, figure di merito del carico utile, dispositivi a banda larga per raggiungere velocità di trasmissione di simbolo (*symbol rate*) molto elevate, cosi come richiesto dalle sfidanti richieste di capacità di traffico da parte della utenza appaiono imprescindibili sia per il raggiungimento dei livelli richiesti di sicurezza sia per riconfigurare il sistema a seconda dello stato di congestione spaziale ottimizzandone le risorse.

La capacità dell'industria italiana di porsi al centro della realizzazione in ambito europeo di un tale tipo d'infrastruttura integrata di telecomunicazioni, orientata all'interconnessione in sicurezza di entità governativo/istituzionale, rappresenta una opportunità unica per realizzare sistemi innovativi e integrati capaci di supportare servizi ad elevatissimo valore aggiunto e innovativo.

La giustapposizione di lanciatore, satellite, *payload*, centri di controllo e missione terrestri, terminali dell'utente, piattaforma applicativa e servizi a valore aggiunto associati alla realizzazione di un tale tipo di infrastruttura nell'attuale scenario industriale italiano, permetteranno di inserire il nostro Paese nel novero dei detentori mondiali dell'intera filiera dell'alta tecnologia per le telecomunicazioni spaziali e non solo.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Molti elementi d'innovazione sono in fase di pre-sviluppo rendendo quindi reale l'opportunità sin qui disegnata:

PIATTAFORMA Satellite

cioè l'insieme dei sottosistemi che rendono fruibile lo slot orbitale, quali:

- propulsione elettrica;
- radiatori termici dispiegabili;
- realizzazione di strutture "*ad-hoc*" via *Additive Layer Manufacturing* (ALM).

PAYLOAD

dispositivi con tecnologie operanti in bande di frequenza Q/V come RF *Front End, Low Noise Amplifier* (LNA), *de-multiplexer/down-converter* in banda V, amplificatori di potenza anche a stato solido e Output Multiplexers in banda Q:

- antenne multi fascio ad elevate prestazioni per le bande K/Ka, in grado di supportare anche fasci molto direttivi di trasmissione e ricezione sulle bande Q/V;
- dispositivi di processamento digitale rigenerativi, trasparenti o ibridi con capacità complessiva e di conversione A/D dimensionato al traffico atteso, dell'ordine di decine/centinaia di Gbps complessivi e di qualche GHz per linea I/O con possibilità di conversione diretta o pseudo-diretta da RF a banda base.

TERRA

- lo sviluppo di soluzioni per implementare meccanismi di diversità geografica, quali quelli basati sulla duplicazione dei sottosistemi RF/Antenna, delle stazioni di terra (*gateway*), su due o più siti, ben distanti e geograficamente separati, ma ad una distanza ottimale per essere interconnessi via rete terrestre, in modo di massimizzare la disponibilità di collegamento complessivo, contrastando le ben note elevate attenuazioni causate da fenomeni di metereologici, sui collegamenti in banda Q/V e superiori che si possono avere su un singolo sito. In Figura 20.2 è mostrato schematicamente lo schema di diversità geografica.

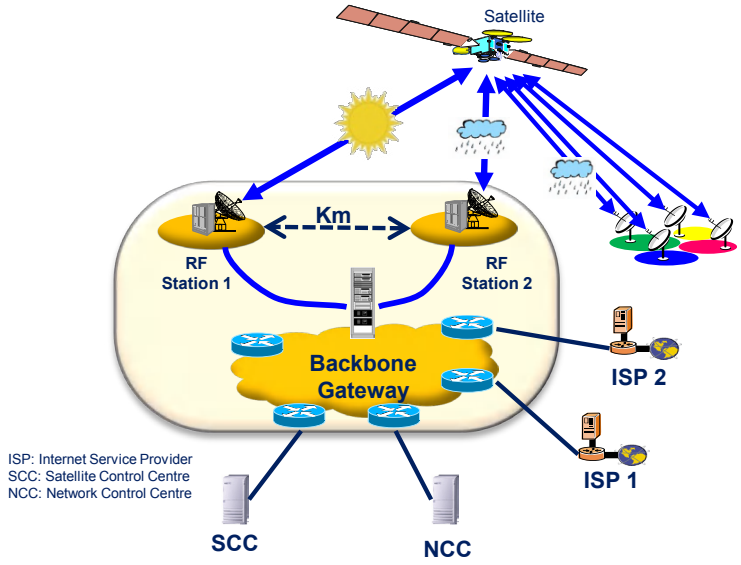


FIG. 20.2 DIVERSITÀ GEOGRAFICA PER GARANTIRE LA CONNETTIVITÀ DEL FEEDER-LINK IN BANDA Q/V

Ciononostante è ancora necessario un importante sforzo per passare dalla fase di pre-sviluppo alla fase operativa.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

La comunità industriale, con il supporto fortemente collaborativo di quella scientifico/accademica coinvolta nelle tecnologie descritte, ha da tempo avviato le attività di studio e sviluppo, attingendo a finanziamenti molto variegati in gran parte basati su investimenti interni ma anche e soprattutto supportati dalla nostra Agenzia Spaziale (ASI) e da quella europea.

In questo momento storico, per le *tecnologie spaziali* in cui all'orizzonte si vede una *forte convergenza* con le reti e i *servizi terrestri*, oltre che all'affermarsi di nuove tipologie di sistemi per lo spazio (costellazioni di satelliti molto popolate e interconnesse tra loro, utilizzo di satelliti a bassissimo costo posizionate su orbite bassissime ovvero tra 200 e 600 km ed altre ancora) è necessario incrementare il supporto economico e soprattutto ben definire le strategie di sviluppo tecnologico per lo spazio dell'immediato futuro. In tal senso è necessario, specie in Italia, aumentare, in un certo qual modo, la "propensione al rischio", inteso come la disponibilità a investire su tecnologie non ancora mature, ma sicuramente promettenti, uscendo dalla logica ormai consolidata del "investo solo su quanto sono sicuro che funziona perché ha già funzionato!".

Un tale sforzo consentirebbe la realizzazione di una *filiera tutta italiana* che copra il complesso degli aspetti di realizzazione e dispiegamento dei servizi e delle relative infrastrutture.

È positivo che in tal senso e in questo momento storico si rilevi la convergenza di flussi economici dalle varie realtà istituzionali ed industriali con il fine comune di realizzare tale filiera nella sua massima estensione.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 21

TECNOLOGIE DI GUIDA E NAVIGAZIONE AUTONOMI TRAMITE ELABORAZIONE DI IMMAGINI

Sin dall'inizio dell'era spaziale, negli anni '60 è nata l'esigenza di realizzare operazioni di ***rendez-vous*** nello spazio, cioè di permettere ad un veicolo spaziale di avvicinarsi ad un altro per compiere manovre di attracco. Più di recente questa capacità è stata messa in pratica per avvicinarsi ad asteroidi o comete al fine di esplorarli da vicino e raccogliere campioni o, necessità cresciuta moltissimo negli ultimi anni, di avvicinarsi ad un detrito orbitale per ispezionarlo ed eventualmente rimuoverlo.

Le prime operazioni di *rendez-vous* a breve distanza nello spazio si effettuavano grazie alla presenza di astronauti e cosmonauti a bordo che, con il supporto di sensori radar, guidati dalla stazione di terra e del computer di bordo, guidavano il satellite *chaser* verso il satellite *target*, riducendo la distanza e la velocità relativa, con le ultime fasi che erano guidate a vista. Ovviamente queste manovre erano e rimangono tutt'ora estremamente critiche e rischiose con la necessità di definire manovre di abbandono dell'attracco e di vie di fuga predeterminate in caso di situazioni inattese o guasti.

Negli ultimi anni il progresso nelle capacità di elaborazione dei computer hanno permesso l'utilizzo di *algoritmi* più sofisticati, che attraverso l'elaborazione di immagini possono permettere tecniche di guida e navigazione autonoma, ovvero senza la presenza dell'uomo a bordo, riducendo la massa complessiva del sistema ed aumentando il grado di autonomia rispetto a sistemi passati.

Questa tecnologia abilita molteplici nuove iniziative di esplorazione robotica, di esplorazione umana, ma anche di nuove sistemi di trasporto e servizio di altri satelliti. Nell'esplorazione robotica si può citare il concetto attuale del progetto *Mars Sample Return* che prevede il *rendez-vous* e la cattura autonoma di una sfera contenente campioni di suolo e atmosfera di Marte, portati in orbita marziana da un lancio effettuato dalla superficie del pianeta, per riportarli sulla Terra.

Nell'esplorazione umana i progetti attuali prevedono l'assemblaggio in orbita di nuove stazioni spaziali, in orbita lunare come il *Lunar Orbital Platform-Gateway*, ma anche in orbita terrestre come la futura stazione spaziale cinese o le infrastrutture private. Inoltre le molteplici iniziative che sono in atto per il servizio ai satelliti in orbita (*on orbit servicing, OOS*) o di rimozione dei relitti spaziali (A*ctive Debris Removal, ADR*) richiedono sempre di più un sistema di navigazione relativamente semplice, affidabile, leggero ed autonomo anche in presenza di situazioni anomale e guasti nel sistema.

Questi sistemi richiedono l'impiego di molteplici tecnologie avanzate:

- **sensori ottici**, in altre frequenze oltre il visibile (es. infrarosso) per acquisire immagini in diverse condizioni di illuminazione, con diverse lunghezze focali (corto o lungo raggio) e con risoluzione adeguate per i filtri di navigazione, ma anche per inviare immagini di ispezione a terra;

- **algoritmi e software di elaborazione di immagini** (*image processing*) in grado di riconoscere il bersaglio rispetto allo sfondo, di seguirlo durante le operazioni di avvicinamento e di stimare distanza, velocità ed assetto relativi estraendo dall'immagine complessiva punti caratteristici (es. maniglie, fori di attracco, anelli) e seguire questi obiettivi per poter avvicinarsi fino all'aggancio;
- **guida e controllo** usando diversi sistemi propulsivi (chimici o elettrici), ed integrando informazioni proveniente dalle immagini e da altri sensori (es. GPS, LIDAR, radar, altri sensori a bordo). Tecniche di ottimizzazione delle traiettorie basate sulla posizione raggiunta sono fondamentali per poter ridurre il propellente necessario;
- **sistemi di illuminazione** per garantire l'ispezione e permettere le operazioni in prossimità anche in condizioni di illuminazione non adeguate;
- **controllo collaborativo con sistemi robotici** di cattura, attracco o manipolazione. Sono tecniche di controllo innovative necessarie alla movimentazione di meccanismi tra i due oggetti, mantenendo il controllo dell'assetto relativo ed assoluto sia del *chaser* da solo quando in fase di avvicinamento e di attracco sia di tutto il sistema complessivo dopo l'aggancio;
- **sistemi autonomi di riconoscimento e recupero da anomalie e guasti.** Come detto le funzionalità della FDIR (*Failure Detection Isolation and Recovery*) sono di importanza fondamentale. Il riconoscimento rapido di un malfunzionamento o di una deriva rispetto ai piani, la scoperta della causa di tale problema, la neutralizzazione di questo effetto nocivo e il ripristino del funzionamento complessivo sono parametri fondamentali per la riuscita di queste operazioni. Massima garanzia deve essere data all'evitare collisioni in particolare se un oggetto o entrambi hanno presenza umana a bordo;
- **preparazione di satelliti** per favorire il *rendez-vous* ed il riconoscimento di oggetti a corto raggio (es. con adeguati codici o *marker*) sono elementi che devono essere presi in considerazione per mitigare i problemi descritti prima;
- **tecnologie di validazione e verifica a terra** di tutta la catena funzionale per il *rendez-vous*, la cattura o qualsiasi altro tipo di servizio in prossimità è una necessità indiscutibile. Prima di lanciare un sistema così complesso si devono eseguire tutte le verifiche a terra per evitare problemi in volo. In questo contesto la funzioni che coinvolgono l'elaborazione di immagini richiedono *set up* dedicati e molto flessibili per poter riprodurre tutte le situazioni in volo.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Per poter sviluppare quanto descritto è necessario sviluppare tecnologie e tecniche di controllo *ad hoc*. Per quanto riguarda le tecnologie si possono citare le camera multispettrali o multifocali per le vari fasi di avvicinamento e di determinazione della posizione relativa del *target*. Anche strumenti LIDAR, che permettono di stimare la distanza e l'orientamento del *target* sfruttando luce *laser*, sono strumenti tecnologici fondamentali in studio in Italia. Ovviamente anche tutta la catena di elaborazione di immagini, loro compressione, estrazione di parti salienti e determinazione della posizione relativa sono tecnologie da sviluppare. Una forte attività di sviluppo su questi aspetti, processori veloci, utilizzo di FPGA (ovvero capacità di dedicare componenti a svolgere funzioni specifiche come *image processing* e *feature extraction*) in parallelo all'elaborazione SW

sono ulteriori tecnologie attualmente in sviluppo e come detto necessarie per queste attività. La possibilità eventualmente di riconfigurare la FPGA a svolgere altri compiti in fasi diverse di missione è anch'essa una soluzione allo studio che darebbe flessibilità molto interessanti.
In parallelo sviluppo di nuove *tecniche di controllo* e ottimizzazioni di traiettorie sono elementi fondamentali per la progettazione di queste missioni. Ovviamente simulatori dinamici e sistemi di verifica all'avanguardia sono parti fondamentali per la riuscita di questi progetti

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

A livello di sistema, Thales Alenia Space in Italia sta studiando sistemi di trasporto e servizi di prossimità ad altri veicoli spaziali, dove la tecnologia di elaborazione di immagini e di navigazione relativa è un elemento chiave, per sistemi che dovranno essere operativi nella prima metà degli anni venti. Anche la fase di definizione preliminare dell'*Earth Return Orbiter* (ERO) nella missione *Mars Sample Return* (MSR) vede la necessità di sviluppare un sistema autonomo ed affidabile per un lancio previsto nella seconda metà degli anni venti.
Molti sistemi hanno già volato con sistemi di navigazione relativa, dagli anni 2000. A livello europeo con *l'Automated Transfer Vehicle* (ATV) che ha volato dal 2008 al 2015 con cinque missione logistiche alla Stazione Spaziale Internazionale e che prevedeva un sistema di attracco automatizzato basato su sensori GPS, sensori ottici e LIDAR (forniti dalla tedesca Jena-Optronik). Nell'ultima missione è stato anche sperimentato, con successo, sensori ad infrarossi sviluppati dalla francese Sodern. Negli Stati Uniti la DARPA ha finanziato lo sviluppo e la dimostrazione di tecnologie autonome di navigazione e cattura tramite elaborazione di immagini. La missione *Orbital Express* lanciata nel 2007 dimostrò in orbita un sistema comprensivo di navigazione autonoma e cattura. In Giappone, la missione *Hayabusa* lanciata nel 2003 si è basata su sensori ottici per effettuare l'atterraggio sull'asteroide *Itokawa*.

Nella decade corrente questi sistemi hanno avuto sempre un maggior interesse e diversi studi si sono avvicendati per trovare sistemi integrati più leggeri, affidabili e con maggiori prestazioni. Un esempio sono gli studi sviluppati da Thales Alenia Space in Italia nell'ambito dei progetti STEPS, STEPS2 e STRONG dove le tecnologie relative all'elaborazione di immagini in diversi studi sono state studiate e dimostrate per la navigazione di *rover*, *lander* e sistemi di trasporto. Tale tecnologie sono considerate essenziali per lo sviluppo di sistemi futuri come MSR-ERO o nei sistemi di trasporto in sviluppo in Thales Alenia Space, attualmente chiamato *SpaceSTART.*
A livello internazionale il futuro mercato per l'*on-orbit servicing* (si rimanda alla Tecnologia Sistemi Avanzati per Integrazione, Rifornimento, Trasporto e Rimozione Satelliti/Detriti in Orbita) ha accelerato lo sviluppo e la presenza di questi sistemi, ad esempio nel futuro *Mission Extension Vehicle* di Orbital ATK (Stati Uniti), nel futuro space drone di *Effective Space* (Israele/Inghilterra) o nello *Space Tug* dichiarato da Airbus Defence and Space
Il contributo delle tecnologie italiane su questi temi è molteplice, sia a livello di sensoristica (Lidar, foto e videocamere) sia di sistemi di calcolo (*on-board computer* con affiancamento di schede dedicate) sia anche di tecnologie più dirette alla produzione di energia elettrica (pannelli solari molto efficienti) e di *thruster* per il controllo fine). Tutte queste unità sono state sviluppate e hanno una forte esperienza di volo.

Tutta la conoscenza sistemistica e la capacità di assemblare e verificare gli oggetti a terra prima del loro utilizzo rendono l'Italia una nazione all'avanguardia in questo campo dove ovviamente è necessario perseverare e crescere continuamene per non perdere il ruolo guadagnato.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 22

CONTROLLO AMBIENTALE EVOLUTO

L'industria spaziale italiana, in particolare il sito di Torino di Thales Alenia Space in Italia, a livello globale ha un ruolo primario nel *design*, nello sviluppo, nell'integrazione e nei test di **moduli pressurizzati**, sia **abitabili** sia **logistici** (cargo). Questa lunga tradizione è testimoniata dal notevole numero di elementi "*made in Italy*" che hanno fatto o fanno tuttora parte della Stazione Spaziale Internazionale (PMM, Columbus, Nodi, Cupola, Cygnus, ATV, MPLM).

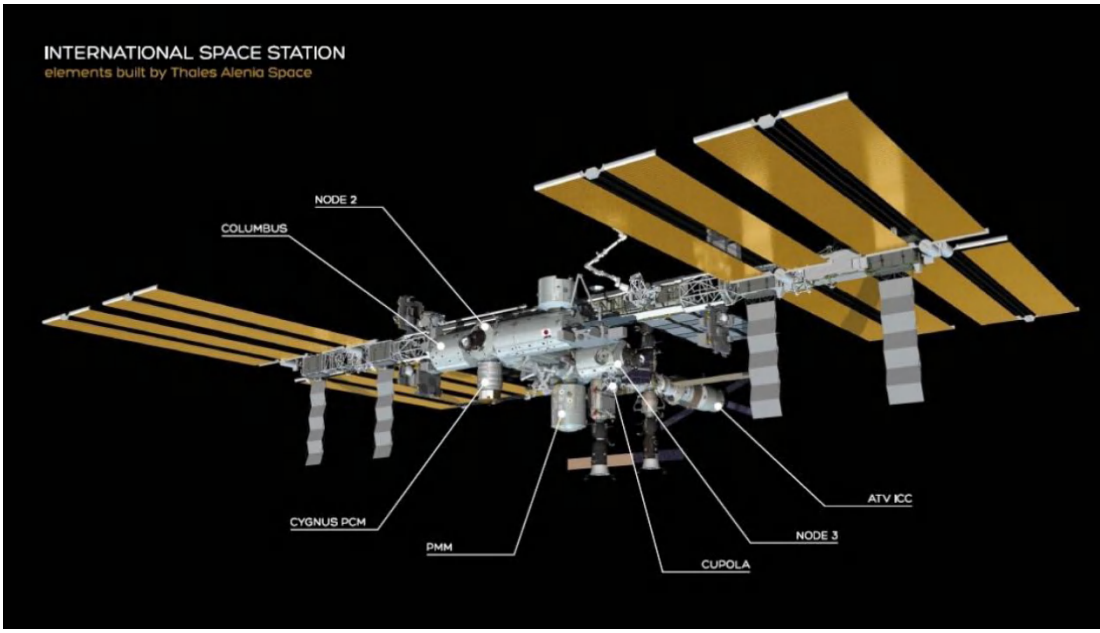
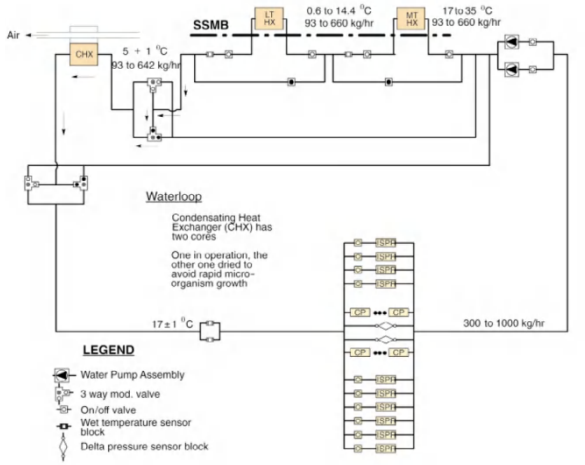


FIG. 22.1 ELEMENTI PRESSURIZZATI E ABITABILI COSTRUITI DA THALES ALENIA SPACE IN ITALIA, A DIMOSTRAZIONE DELLA FORTISSIMA PRESENZA NAZIONALE NELL'AMBITO DELLE INFRASTRUTTURE ORBITALI E DEI SISTEMI DI ESPLORAZIONE (CREDIT THALE ALENIA SPACE).

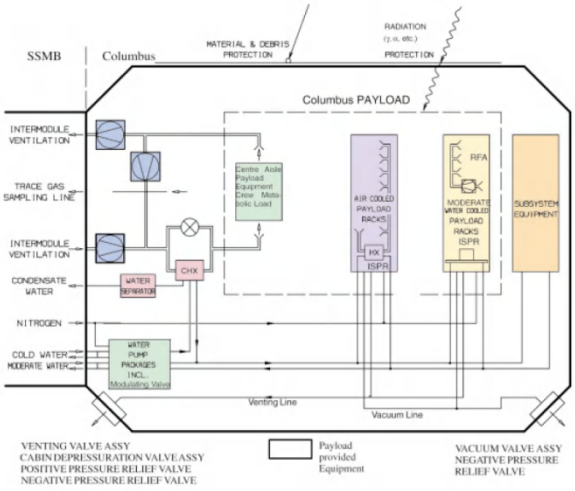
Tale posizione di vantaggio competitivo è stata raggiunta anche grazie all'oculato investimento pubblico che ha supportato lo sviluppo tecnologico e ha consentito alle aziende italiane di diventare interlocutore privilegiato per *partner* istituzionali e commerciali di tutto il mondo. Si prenda come esempio la partecipazione al modulo europeo Columbus (ambito istituzionale) oppure la fruttuosa *partnership* con Northrop Grumman Innovation Systems (ex Orbital ATK) per il sistema di trasporto Cygnus.

Negli ultimi anni sta prendendo nuovo slancio, sia a livello istituzionale sia a livello commerciale, l'**espansione della presenza umana in avamposti orbitali**. I futuri avamposti sono localizzati sia in orbita bassa terrestre (LEO, *Low Earth Orbit*), sia in orbite cislunari.

Grazie al buon posizionamento internazionale, la grande industria italiana si è guadagnata il coinvolgimento in tutti i principali studi attualmente in corso. L'obiettivo è la fornitura sia di moduli di stazione sia di moduli di trasporto. Tra le competenze chiave necessarie alla realizzazione di tali elementi vi sono la progettazione, l'integrazione e la validazione di **Sistemi di Controllo Ambientale** (ECS, *Environmental Control System*). Per ECS si intende la combinazione di **controllo termico attivo** (ATCS, *Active Thermal Control System*) e funzioni di **supporto alla vita** (ECLSS, *Environmental Control and Life Support System*).



(A)



(B)

FIG. 22.2 RAPPRESENTAZIONE SCHEMATICA DEL SISTEMA ECS DEL MODULO LABORATORIO EUROPEO COLUMBUS: CONTROLLO TERMICO ATTIVO (A) E GESTIONE DELL'ARIA DI CABINA (B). (CREDIT ESA)

Il controllo ambientale include tutte le tecnologie relative alla vita nello spazio per poter:

- assicurare e mantenere un ambiente idoneo e confortevole alla presenza umana (controllo della temperatura, pressurizzazione, purificazione e deumidificazione dell'aria di cabina);
- garantire l'utilizzo razionale delle risorse disponibili (riciclo e rigenerazione dell'acqua, sistemi di stoccaggio multifunzione);
- gestire il carico termico dei sistemi spaziali (raccolta, trasferimento e smaltimento del calore) per garantire il mantenimento delle condizioni ideali di funzionamento;
- aumentare le capacità operative dei veicoli cargo;
- far fronte ad ambienti di radiazione più severi rispetto all'orbita bassa terrestre.

Per mantenere questo ruolo di *leadership* e creare nuove opportunità di business è ora necessario **aggiornare il portfolio nazionale di sistemi ed equipaggiamenti ECS**, sostituendo gradualmente quelli che non sono più in produzione o sono divenuti tecnologicamente obsoleti.
È quindi necessario investire nella definizione e nello sviluppo di componenti fisici (equipaggiamenti) di nuova generazione, per ciascuna delle aree tematiche raffigurate in Figura 22.3.



FIG. 22.3 LE QUATTRO PRINCIPALI DIRETTRICI DI SVILUPPO PER L'ENVIRONMENTAL CONTROL SYSTEM (CREDIT CIRA)

Alcuni esempi di componenti di primaria importanza sono elencati di seguito, raggruppati a seconda della funzione alla quale contribuiscono.

Gestione dell'Atmosfera

Per assicurare e mantenere un ambiente confortevole e idoneo alla presenza umana, l'aria di cabina necessita di alcuni controlli e trattamenti, effettuati utilizzando diversi specifici componenti:

- valvole di regolazione fine, in grado di rilasciare in maniera controllata eventuali eccedenze

di pressione: valvole di controllo pressione e sfiato (PPCV/PPRV: ***positive pressure control valve/positive pressure relief valve***);

- membrane *filtering systems*: sistemi di rilevazione e purificazione di diverse specie chimiche (elementi raccolti in sistemi di controllo dell'aria e sistemi di filtraggio);
- *Condensing Heat Exchangers*: misura il contenuto relativo di vapore e sottrae la parte in eccesso (sensori di umidità relativa (*RH sensor*s) e scambiatori di calore condensanti;
- *Cabin Fan Assembly*: ventilatori capaci di buone portate a fronte di ridotti consumi elettrici e minimo inquinamento acustico che regolano il flusso;
- valvole di regolazione fine, in grado di rilasciare in maniera controllata eventuali eccedenze di pressione (valvole di controllo pressione e sfiato, dette PPCV/PPRV**, *positive pressure control valve*** */ positive pressure relief valve*);
- per controllarne la composizione sono necessari sistemi di rilevazione e purificazione di diverse specie chimiche (elementi raccolti in sistemi di controllo dell'aria e sistemi di filtraggio detti);
- per controllarne il tasso di umidità è necessario misurare il contenuto relativo di vapore e sottrarne la parte in eccesso (sensori di umidità relativa (*RH sensors*), e scambiatori di calore condensanti, ***condensing heat exchangers***);
- per regolarne il flusso, sono necessari ventilatori (*cabin fan assembly*) capaci di buone portate a fronte di ridotti consumi elettrici e minimo inquinamento acustico.

Alcuni esempi:

- per garantire la corretta concentrazione di ossigeno negli ambienti pressurizzati è necessaria la sua **generazione ed il conseguente recupero**; diversi sono i metodi per assolvere a questa primaria funzione dell'ECS: recuperare l'ossigeno dal biossido di carbonio espirato e riciclare l'ossigeno recuperato nell'atmosfera;
- per la rimozione dell'anidride carbonica in passato erano utilizzati esclusivamente filtri di idrossido di Litio in polvere e superossido di potassio, sostituiti oggi da spugne di zeolite con minuscoli pori in grado di bloccare una molecola di CO_2;
- con gli attuali sistemi a bordo della Stazione Spaziale Internazionale (ISS) si può generare, o recuperare, circa il 40% dell'ossigeno richiesto, ma per le future missioni di esplorazione, tale percentuale dovrà aumentare in modo rilevante;
- in questo ambito, l'industria Italiana soffre la concorrenza di altri *Prime Contractor* europei. Ne è un esempio l'Advanced Closed Loop System (ACLS), un sistema di supporto vitale sviluppato recentemente da Airbus Defense and Space, in grado di eliminare il biossido di carbonio, produrre ossigeno, acqua e (come sottoprodotto) metano.

La funzione di deumidificazione sulla ISS è tipicamente affidata a CHX (*Condensing Heat eXchanger*), scambiatore-condensatore provvisto di rivestimento anti-microbico, il cui corretto funzionamento necessita di una periodica manutenzione. Evoluzioni basate su *sistemi passivi* (es. adsorbimento invece che condensazione) sono tra i sistemi di interesse per l'industria italiana.

Gestione dell'Acqua

Per garantire l'utilizzo razionale delle risorse disponibili, si ricicla e si rigenera il più possibile impiegando elementi di stoccaggio multifunzione al fine di:

- ottimizzare la gestione dell'acqua: si sviluppano sistemi in grado di raccogliere, separare, purificare e disinfettare i fluidi di scarto (***water regeneration systems***), minimizzando l'utilizzo di tecnologie a vita limitata e quindi la necessità di parti di ricambio;
- conservare i liquidi (prima e dopo il trattamento): sono necessari componenti per lo stoccaggio. Questi componenti devono essere compatibili con molte specie chimiche diverse (anche aggressive) e chimicamente stabili nel tempo, in grado di mantenere inalterate le proprietà del contenuto oltre che facilmente riempibili/svuotabili, movimentabili ed immagazzinabili. Una promettente soluzione è rappresentata dalle sacche flessibili multiuso (***multipurpose flexible liquid storage bags***) che, oltre a tutte le caratteristiche già menzionate, hanno il pregio di occupare poco spazio quando non in uso e possono permettere di creare, in un brevissimo tempo, vere e proprie pareti protettive contro le radiazioni.

A bordo della ISS sono presenti *due diversi sistemi* per recuperare e potabilizzare l'acqua. Il primo – e più vecchio – è stato sviluppato dai russi, il secondo dagli statunitensi.

Questi sistemi filtrano e purificano il vapore acqueo proveniente dalla respirazione, l'acqua utilizzata per lavarsi ed il sudore degli astronauti. In aggiunta, il sistema statunitense ricicla le urine degli astronauti e di eventuali animali presenti a bordo per mezzo dello *Urine Processing Assembly* (UPA), un impianto di trasformazione dell'urina in acqua. L'acqua estratta dall'UPA diventa potabile dopo un ulteriore trattamento nel *Water Recovery System*.

La tecnologia statunitense si basa sull'utilizzo dello *Iodio* mentre quella russa sull'*Argento in forma ionica*: quest'ultima sembrerebbe particolarmente promettente ed anche la NASA la sta valutando in una possibile ottica di sostituzione dell'attuale metodo utilizzato.

Sia la NASA che l'ESA stanno sottoponendo a test diversi sistemi in grado di recuperare ulteriore acqua. In questo frangente, l'industria italiana ha avuto l'opportunità di progettare e fornire la funzione di rigenerazione dell'acqua di un sistema di volo, nell'ambito del già citato ACLS. Nel caso specifico di ACLS, la funzione è garantita solo se l'acqua in ingresso è condensato atmosferico e fornisce acqua pura non destinata al consumo umano. Nell'ambito della ricerca, si sta già lavorando a un sistema più ampio e versatile, che sfrutta tecnologie adatte anche al riciclo di urina e implementa soluzioni di disinfezione più convenienti. Il tutto in una configurazione più compatta.

Puntare su questi sviluppi permetterebbe di concorrere con altri *player* europei, come Airbus Defense and Space, per la *leadership* nel settore.

Controllo Termico

Per gestire il carico termico dei sistemi spaziali, si raccoglie, trasferisce e smaltisce la *potenza in eccesso*, tramite circuiti attivi che contengono elementi per:

- movimentare il fluido di lavoro, ovvero gruppi di pompaggio fluidico (FPP, ***fluid pump package***);
- regimentare il flusso di refrigerante nei vari rami del circuito, ovvero valvole modulanti a 3

vie (3WMV, **3-*way mixing valve***);
- separare dal fluido di lavoro le inclusioni accidentali e/o fisiologiche di gas incondensabili e vapori, ovvero unità di degasaggio del refrigerante (DU, ***degassing unit***);
- trasferire la potenza dalla sorgente al circuito refrigerante e da un ramo all'altro del circuito stesso, ovvero scambiatori di calore liquido-liquido inclusi i rigenerativi (LLHX, ***liquid-liquid heat exchanger***) e scambiatori di calore gas-liquido (GLHX, ***gas-liquid heat exchanger***);
- dissipare il calore in eccesso verso lo spazio, ovvero **radiatori** con **finiture superficiali di lunga durata**, capaci di mantenere le proprietà termo-ottiche richieste durante l'intera vita operativa del modulo su cui sono utilizzati.

Per aumentare le capacità operative dei veicoli cargo, senza tuttavia penalizzarne masse e volumi con l'introduzione di sistemi di controllo attivo veri e propri, si ricorre a circuiti bi-fase totalmente isolati ed autosufficienti, ovvero a ***loop heat pipe*** di nuova generazione, in grado di funzionare con fluidi non tossici per l'equipaggio, così da poter servire contemporaneamente l'interno e l'esterno dei volumi abitabili.
Vi sono, inoltre, tecnologie applicabili su più lunghi periodi, tese a massimizzare l'efficienza nel trasporto di calore (componenti per circuiti di **controllo termico attivo bi-fase**) o nello smaltimento di calore (**rivestimenti intelligenti o bio-ispirati**, in grado di modulare le proprietà ottiche delle superfici).

Gestione delle Radiazioni
La quantità media di radiazioni a cui un essere umano è esposto sulla Terra equivale a circa 3,6milliSieverts (mSv) all'anno. Questa dose rimane bassa grazie alla densa atmosfera e al campo magnetico protettivo presenti attorno al nostro pianeta. Naturalmente, questo significa che gli astronauti che si dirigono verso la Luna e Marte sono esposti a quantità drasticamente più elevate di radiazioni solari e cosmiche, trovandosi al di fuori di questa protezione.
Sul lungo termine, questa esposizione può portare a effetti dannosi sulla salute e il rischio deve essere mantenuto al di sotto di limiti accettabili. Devono, inoltre, essere pianificate contromisure d'emergenza per evitare le conseguenze a breve termine dell'esposizione a flussi elevati di particelle durante eventi solari particolarmente intensi e difficilmente prevedibili.
Per far fronte a questi severi ambienti di radiazione, si utilizzano sistemi di schermatura innovativi (***radiation shielding***), rendendo così possibili lunghe permanenze di equipaggi anche al di fuori dell'ambiente relativamente benigno dell'orbita bassa terrestre. Dal punto di vista dell'infrastruttura, invece, si deve porre maggiore attenzione agli apparati elettronici: si provvede alla scelta di componenti specificamente progettati per essere più resistenti alle radiazioni, oppure si testano elementi per uso terrestre fino a identificare i più promettenti (***component screening***), compensandone le residue debolezze con opportune ridondanze funzionali a livello di sistema e a livello di software.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO
È possibile identificare due ordini diversi di motivazioni per lo sviluppo:

- la spinta a realizzare il progresso tecnico-scientifico necessario (abilitante) per le future missioni spaziali, che saranno di lunga durata e avranno destinazioni sempre più lontane dal pianeta Terra;
- la necessità di sostenere l'indipendenza commerciale-tecnologica dell'Europa rispetto ad altre aree geografiche e - all'interno di essa – lavorare per un ruolo primario dell'industria Italiana.

Progresso tecnico-scientifico

Nel 2007, quattordici agenzie spaziali, tra cui quella Italiana (ASI), si sono riunite nell'*International Space Exploration Coordination Group* (ISECG) e hanno rilasciato in maniera congiunta un primo piano di coordinamento internazionale per le strategie di esplorazione spaziale ("*The Global Exploration Strategy: The Framework for Coordination*"), la cui ultima versione è stata emessa nel Febbraio del 2018.

La *Global Exploration Strategy* conferma e ufficializza un rinnovato e crescente interesse per l'esplorazione Spaziale, con missioni che traguardano la colonizzazione del pianeta Marte, avendo quali tappe intermedie sia la Luna e le missioni cis-lunari sia le attività a bordo della Stazione Spaziale.

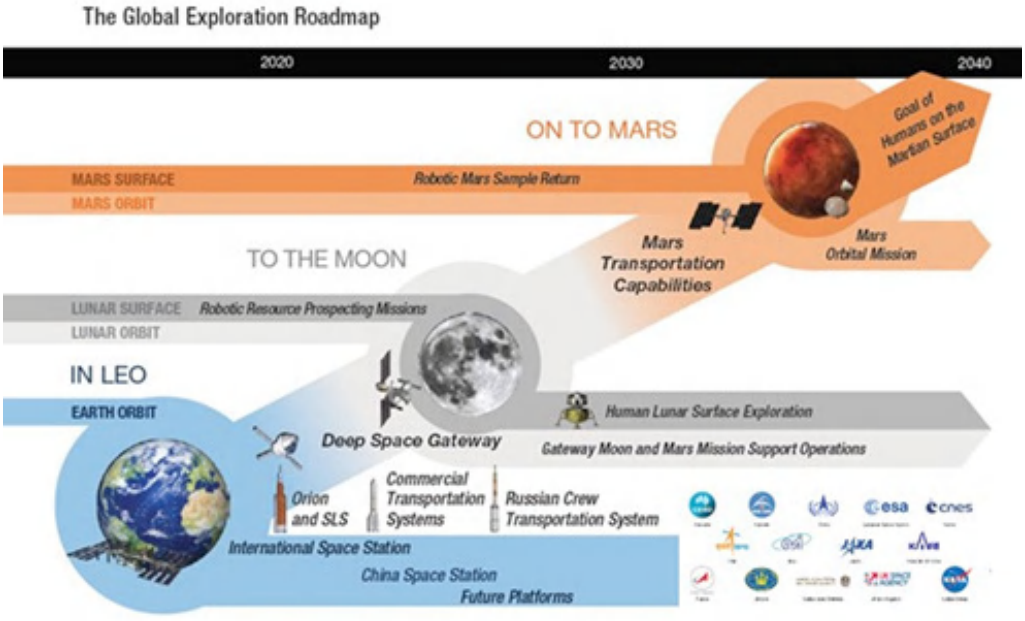


FIG. 22.4 PANORAMICA DELLA GLOBAL EXPLORATION ROADMAP (CREDIT ISECG).

In accordo a questa visione strategica, le future missioni punteranno prima a consolidare le attuali tecnologie (anche attraverso l'utilizzo della Stazione Spaziale Internazionale) e successiva-

mente a sviluppare e qualificare le tecnologie non ancora mature per le missioni di colonizzazione planetaria.
Infatti, dopo quarant'anni di sviluppo, le tecnologie di controllo ambientale e supporto alla vita sono molto evolute, ma restano fortemente dipendenti dalla Terra. L'invio di materiale di sostentamento vitale e la manutenzione dei sottosistemi per il controllo ambientale sulla Stazione Spaziale Internazionale, a circa 400km dalla superficie del nostro pianeta, richiede una attenta pianificazione e una solida catena di approvvigionamento per la consegna entro uno o due giorni dal lancio.
Le tempistiche e i costi associati non sono compatibili con le future missioni di esplorazione e colonizzazione planetaria. È pertanto necessario pensare a tecnologie in grado di rendere più autonomi ed efficienti i sistemi di controllo ambientale, sia dal punto di vista del consumo energetico sia da quello della percentuale di risorse riciclate o rigenerate (che si traduce in indipendenza dalle missioni di rifornimento).
Come ricaduta positiva, la ricerca per lo sviluppo di sistemi di supporto alla vita consentirà anche di migliorare le attuali tecnologie di *In Situ Resource Utilization* (ISRU) per sfruttare le risorse presenti nel nostro sistema planetario e capire come i futuri esploratori potranno massimizzare l'uso di ciò che troveranno intorno a loro.

Indipendenza commerciale-tecnologica

Sulla quasi totalità dei componenti e delle tecnologie precedentemente elencati, al momento permane una situazione di dipendenza tecnologica e strategica da fornitori non-EU (principalmente statunitensi).
Viceversa, in ambito ISS le Aziende Italiane, nel recente passato, hanno più volte assistito inermi allo sviluppo di componenti tecnologici (utilizzati in sostituzione di quelli obsoleti o non più disponibili sul mercato) ad opera di Aziende Europee, proprio per la mancanza di una strategia nazionale di investimenti che consenta loro lo sviluppo di prodotti largamente richiesti a livello industriale.
La possibilità di sviluppare alternative di nuova generazione totalmente europee (e ancor più specificamente italiane) rappresenterebbe un enorme vantaggio per il settore spaziale nazionale.
Di seguito sono elencati alcuni dei benefici ottenibili:

- rimozione di vincoli di export control sulle componenti hardware principali dei sistemi di controllo ambientale → condizione abilitante per l'estensione dei rapporti commerciali con *partner* internazionali quali Russia e Cina;
- possibilità di sviluppare un *design* comune a differenti applicazioni → condizione propedeutica alla riduzione dei costi non ricorrenti e alla possibilità di introdurre nel mercato spaziale una vera e propria "produzione di serie";
- introduzione di componenti tecnologicamente aggiornati e quindi con migliori prestazioni rispetto alla generazione precedente → mantenimento del ruolo di *leadership* e della competitività degli *end-user* (ovvero della grande industria) rispetto ai maggiori concorrenti europei, nonché rinascita di una filiera produttiva di eccellenza per la fornitura di componenti (ovvero della piccola-media industria), capace di riportare sul territorio italiano una maggiore

quota di ritorno geografico (grazie, ad esempio, all'acquisizione di contratti di fornitura per *prime contractor* di diversa nazionalità);
- consolidamento e incremento di *know-how* specifico sul territorio italiano, con rafforzamento della competitività nazionale e consolidamento di filiere produttive privilegiate → aumento dell'indotto del settore spaziale, creazione di nuovi posti di lavoro (sia in posizioni di progettazione/ingegneria, che in posizioni di manifattura/produzione), incentivo all'innovazione di prodotto e al trasferimento di tecnologia dall'accademia all'industria con possibilità di impiego per giovani altamente qualificati (laureati, dottori ed assegnisti di ricerca).

Un ulteriore vantaggio di questi sviluppi è il forte legame con altre applicazioni industriali, che offre opportunità di *spin-in* e *spin-off* tecnologico verso settori affini (aviazione, marittimo, edile per fare alcuni esempi). Vi sono ottime sinergie con aziende (PMI) già attive nella produzione di equipaggiamenti simili per applicazioni terrestri, con interessanti potenzialità per la creazione di una filiera produttiva interamente italiana.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

Al momento, la *leadership* a livello di componente è in seno a nazioni che hanno (più o meno recentemente) investito nell'indipendenza e nell'innovazione tecnologica: Stati Uniti, Russia, Cina, Giappone.

Nel panorama europeo, l'Italia ha avuto un ruolo privilegiato fino agli anni '90, con lo sviluppo del modulo laboratorio Columbus. In seguito, l'ecosistema produttivo si è sfaldato e disperso. Molti dei precedenti fornitori di equipaggiamenti hanno dismesso la produzione o sono completamente usciti dal *business* spaziale.

Permangono alcune nicchie di competenza specifica sul controllo ambientale in Germania (ad es. Airbus Defense and Space).

La capacità di progettare e integrare sistemi complessi di controllo ambientale è ancora presente. Tuttavia, a livello di componentistica *hardware*, l'Italia e l'Europa sono carenti – quando non completamente sprovviste – di autonomia.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 23

STOCCAGGIO E DISTRIBUZIONE DI ENERGIA

La tecnologia delle *Fuel Cells Rigenerative* è concepita come sistema di **accumulo di grandi quantità di energia** elettrica e termica. Il suo principio di funzionamento è basato sull'accoppiamento di due processi elettrochimici opposti, quello dell'elettrolisi dell'acqua, che scompone la molecola d'acqua in idrogeno e ossigeno, e del suo inverso che ricompone la molecola d'acqua.
Nello spazio la tecnologia delle Celle a combustibile è stata utilizzata fin dalle origini dei programmi spaziali americani. Le missioni Mercury, Apollo e Shuttle utilizzarono infatti questa tecnologia per la generazione di energia. Il limite di queste applicazioni stava nella non ri-generabilità delle risorse. Quando la riserva di Idrogeno e Ossigeno si esauriva, il sistema non era più in grado di ricaricarsi. Con il forte sviluppo degli ultimi anni nel campo degli elettrolizzatori si è resa possibile la realizzazione di un sistema a ciclo chiuso ricaricabile, proprio come una batteria ricaricabile.
La tecnologia rigenerativa delle celle a combustibile è un **sistema elettrochimico** utilizzato per immagazzinare energia quando è disponibile l'alimentazione da una fonte esterna (pannelli solari) e rilasciarla quando le fonti non sono accessibili, rendendo l'energia elettrica continuamente disponibile. Il principio è lo stesso delle batterie chimiche con fasi alternate di carica e scarica. Le celle a combustibile rigenerative sono composte da due elementi fondamentali: una cella a combustibile e un elettrolizzatore. Il processo immagazzina energia attraverso il processo di elettrolisi, dividendo la molecola di acqua in idrogeno e ossigeno. L'energia sarà immagazzinata fisicamente all'interno dei serbatoi dei reagenti, uno per l'idrogeno e uno per l'ossigeno. Quando è richiesta energia, i reagenti vengono ricombinati all'interno di una cella a combustibile (*fuel cell*), producendo energia elettrica, energia termica e acqua che verranno utilizzati per il successivo ciclo di ricarica.

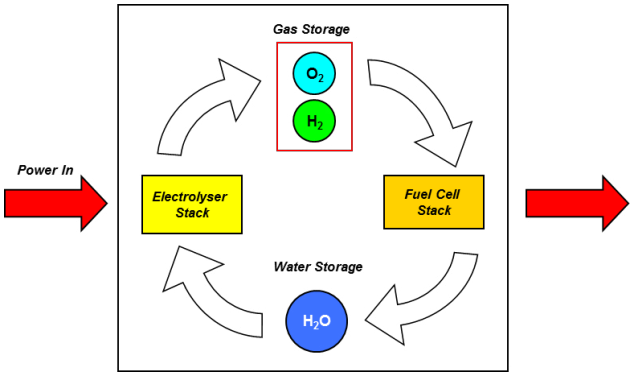


FIG. 23.1 PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DELLE FUEL CELLS RIGENERATIVE

Le future missioni spaziali avranno crescenti bisogni in termini di potenza e immagazzinamento di energia per aumentare le performance e l'autonomia. Le batterie secondarie tradizionali hanno una densità di energia limitata e anche la loro evoluzione non sembra in grado di soddisfare tali requisiti.
Confrontando le tecnologie agli ioni di litio, che hanno una densità energetica stimata di 180-200 Wh/kg, l'**RFC può raggiungere 500-600 Wh/kg**. In generale maggiore è l'energia da immagazzinare maggiore sarà la sua densità di energia.
Un sistema a *fuel cells* rigenerativo può essere utilizzati ogni volta sia necessario conservare una elevata quantità di energia. Esempi nel campo spaziale sono le grandi sonde robotiche, un satellite geostazionario ad alta potenza, una infrastruttura orbitale o un sistema di trasporto di superficie.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

La necessità di sviluppo della tecnologia RFC emerge dal lentissimo progresso fatto nelle tecnologie di stoccaggio dell'energia più tradizionali. Infatti le attuali batterie al litio hanno avuto un progresso, dal punto di vista della densità di energia, molto limitato. Anche le celle di ultimissima generazione (o in corso di sviluppo) prospettano densità di energia molto più elevate ma non ancora in grado di competere con la tecnologia RFC.
Questa tecnologia trova un punto di forza anche del punto di vista la vita operativa. Gli studi in corso evidenziano il basso numero di cicli ottenibili dalle celle di nuova generazione mentre RFC può vantare una vita operativa nell'ordine dei 5 anni estendibile attraverso manutenzione.
Ultimo aspetto da non trascurare è la sostenibilità ambientale. Mentre le batterie al litio richiedono processi ancora da sviluppare per lo smaltimento e il riciclo, la tecnologia delle *fuel cells* è intrinsecamente "verde" dato l'alto livello di riciclabilità e di materiali inerti che compongono il sistema. Questo aspetto è rafforzato dal fatto che il prodotto del processo è acqua. Inoltre le batterie al litio hanno portato ad una corsa di grandi gruppi industriali e di nazioni ad assicurarsi le risorse di litio attualmente disponibili per coprire le necessità delle applicazioni terrestri.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA ED ALL'ESTERO

La tecnologia RFC ha visto il sviluppo concettuale e tecnologico a partire dagli anni 2000, principalmente da parte di NASA. Da queste attività e dall'impulso fornito dall'*automotive*, sono state sviluppate le tecnologie abilitanti allo sviluppo di un sistema integrato. Attualmente il livello maturazione tecnologica è TRL5. L'Agenzia Spaziale Europea (ESA) ha finanziato nell'ultimo decennio alcuni studi concettuali e di sviluppo degli elementi tecnologici necessari. Thales Alenia Space ha proceduto con finanziamenti interni e attraverso programmi di ricerca cofinanziati da Regione Piemonte e Unione Europea allo sviluppo della tecnologia portandola a TRL 5 per applicazioni terrestri e TRL4 per applicazioni a zero-G.



FIG. 23.2 DIMOSTRATORE SISTEMA A CELLE COMBUSTIBILE RIGENERATIVO (CREDIT THALES ALENIA SPACE)

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

Il costo di un sistema RFC dipende molto dalla sua applicazione e dalla sua taglia. Si può passare da un piccolo sistema dimostrativo per validare le performance in orbita ad un sistema operativo da centinaia di kWh. Studi in corso evidenziano la possibilità di dimostrare la tecnologia in orbita con circa 5 milioni di euro, operazioni e lancio esclusi. Un sistema di larga taglia per applicazioni terrestri può costare intorno ai 20M .

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 24

OTTICA E FOTONICA PER LO SPAZIO: LA NUOVA FRONTIERA PER INNOVARE ALLA VELOCITÀ DELLA LUCE

Oggigiorno, le tecnologie ottiche sono annoverabili tra quelle più innovative e promettenti per lo spazio dell'immediato futuro, in grado di affiancarsi, a breve, a quelle in radio-frequenza (RF) specie nelle connessioni punto-punto (*point-to-point* o PoP), consentendo un notevole miglioramento sia in termini di affidabilità che di prestazioni nello comunicazioni.

Le qualità annoverabili per tale tecnologia sono innumerevoli e comprendono, fra l'altro, una forte immunità alle interferenze, alte prestazioni in termini di banda e, quindi, velocità di trasmissione (*throughput*), una notevole robustezza fisica dei relativi componenti in ottico ed altre qualità che sicuramente pongono tale tecnologia in una posizione di notevole interesse per chi, da tempo, si occupa di spazio ma anche di reti terrestri.

L'utilizzo di connessioni ottiche in spazio libero, anche conosciute come *Free Space Optic* (FSO), hanno già dimostrato e stanno continuando a farlo, la loro validità e potenzialità per quanto riguarda le connessioni tra satelliti (*Inter-Satellite Link* - ISL). Il progetto *European Data Relay System* (EDRS) di ESA (vedi Figura 24.1) è uno dei sistemi più recenti che implementano tale tecnologia, preceduto dall'esperienza di ARTEMIS che è stato uno dei primi satelliti europei a dimostrare e utilizzare concretamente le connessioni ISL in ottico per il trasferimento di grosse moli di dati in tempi ridottissimi.



FIG. 24.1 LINK OTTICI NEL SISTEMA SATELLITARE EDRS
https://artes.esa.int/edrs/overview



FIG. 24.2 LINK OTTICO TRA I SATELLITE ARTEMIS E OICETS
https://spaceflightnow.com/news/n0104/30artemis

La notevole accelerazione nel progresso delle tecnologie spaziali, sta consentendo sempre di più di poter fornire agli utenti applicazioni eseguibili anche su reti satellitari (accesso ad Internet, telefonia, ecc.).

Lo sviluppo, infine, di nuove costellazioni satellitari basate su satelliti piccoli (micro/mini-satelliti, *CUBESAT* e quant'altro) in orbita bassa, definite *Very Low Earth Orbit* (VLEO), sta stimolando la concezione e la necessità di una vera rete interconnessa tra sistemi satellitari (LEO-GEO, LEO-MEO, VLEO- LEO, VLEO-GEO, ecc...) e reti terrestri il più "trasparente" possibile (*seamless*) per l'utente. In Figura 24.3 è riportata un'architettura concettuale che mostra come le costellazioni satellitari e le reti terrestri potrebbero interconnettersi tramite *link* ottici ad alte prestazioni.

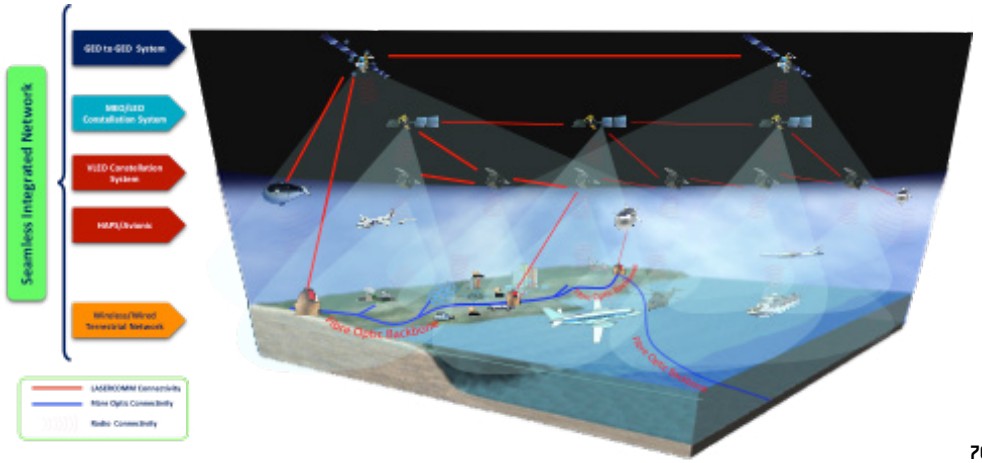


FIG. 24.3 RETE "TRASPARENTE" INTEGRATA TRA SPAZIO E TERRA (AUTHOR: V. SCHENA)

Le infrastrutture di comunicazione ottiche delle reti terrestri, d'altro canto, si stanno rapidamente espandendo ovunque concentrando la loro attenzione nel collegare prevalentemente aree urbanizzate del mondo, specie in quello occidentale. Un altro aspetto da considerare è che tali infrastrutture sono di tipo punto-punto richiedendo un massiccio dispiegamento e, quindi, costose in termini d'investimento, giustificato essenzialmente dalle altre prestazioni in termini di banda/bitrate per utente. Questo comporta che solo alcune aree del Mondo concentrano gli investimenti per tali infrastrutture di connettività, aumentando il divario sociale e di opportunità tra zone del Mondo ricche e le altre più povere: questo, sostanzialmente, aumenta il *Digital Divide*.
L'interesse di vari enti come le agenzie spaziali, gli enti di ricerca e molte realtà industriali del settore ad alta specializzazione (industrie spaziali, operatori di reti, industrie manifatturiere di fibre e componenti ottici, ecc...) stanno da tempo cercando di rispondere all'esigenza d'integrare architetture di reti satellitari e terrestri per mezzo di reti di trasporto dati basate su tecnologia ottica (*Terabit Optical Transport Network* - OTN) tali da consentire l'estensione della rete in fibra ottica terrestre anche nello spazio (*Fibre in the Sky*). Questa iniziativa ha un duplice scopo:

- sopperire ai limiti prestazionali che le attuali reti stanno raggiungendo (da gigabit a terabit ed oltre);
- fornire uno strumento tecnologico efficace per ridurre la complessità nel *link* sistemi terra-bordo per i sistemi spaziali, che oggi si sta palesando con l'affermarsi dei sistemi detti *Very*

High Troughput Satellite (VHTS) e *Mega-Constellation* che dovrebbero affiancarsi e competere con le attuali reti cellulari.

Le tecnologie ottiche costituiscono dunque la nuova frontiera tecnologica per le telecomunicazioni e non solo, in grado di consentire una vera *interoperabilità* tra tipologie di reti effettivamente diverse tra loro (reti terrestri e satellitari, reti di RPAS, di HAPS e via discorrendo) e tra campi d'applicazione altrettanto variegati (TLC, EO, NAV, *Deep-Space*). Le tecnologie ottiche, grazie alla loro scalabilità e flessibilità, possono effettivamente consentire la fusione e l'interoperabilità tra reti di diversa natura (satellitari e terrestri), riducendo i costi d'implementazione e quelli operativi.
In conclusione l'obiettivo da raggiungere, nel breve e medio termine, è l'implementazione di una rete ad alto *bitrate* o *throughput* nello spazio e in particolare di consentire, in maniera totalmente trasparente, la sua interconnessione anche con le reti terrestri già esistenti e in via di ulteriore sviluppo.
I passi concreti per fare ciò sono così identificabili:

- definire e validare in maniera concreta i concetti di sistema "*end-to-end*" e le missioni che tali reti ottiche possono soddisfare;
- stabilire ed analizzare bene le interfacce esterne (utenti, operatori, tipologie di reti terrestri) ed interne (*feeder-link* ottici, ISL ottici, *payload*) e definirne le implicazioni per la loro implementazione;
- definire in dettaglio le tecnologie efficaci e nuove da implementare rispetto a quelle già esistenti, valutandone i tempi per svilupparle (entro il 2025), i rischi associati e i costi;
- definire delle *roadmap* di sviluppo, identificando le tecnologie e gli attori necessari (*stakeholder*) e i costi associati.

L'elemento innovativo dell'attività descritta è di supportare ed "essere parte" come Sistema Paese in maniera consistente ed efficace all'attività europea per lo sviluppo della tecnologia ottica e anche fotonica per le applicazioni spaziali in vista di una loro estensione verso le reti terrestri.
Visto, infatti, i limiti che le tecnologie RF ed elettroniche stanno raggiungendo in ambito spaziale e terrestre è necessario esplorare e valutarne di nuove. Utilizzando il criterio di sviluppo prestazionale rappresentato dallo sfruttamento tecnologico di frequenze sempre più alte dello spettro radio elettromagnetico (bande Ku, Ka, Q/V, W), è invitabile considerare in tale tendenza anche lo spettro infrarosso e visibile, ovvero le frequenze in cui operano le tecnologie ottiche (tipicamente le fibre ottiche si attestano su segnali con una lunghezza d'onda da 1.062 a 1.565 nm).
Alcune delle ragioni che rendono la tecnologia ottico/fotonica molto promettente sono:

- migliori prestazioni in termini di banda passante e *bitrate* (bit scambiati per secondo), ovvero link che possono gestire altissimi volumi di traffico dati ("*throughput*") con velocità che raggiungono i terabit (1012 bps) e oltre;
- conseguentemente al precedente punto, riduzione dell'ingombro del carico utile a bordo del satellite di circa il 30% e, considerando l'attuale sviluppo tecnologico, tale percentuale tenderà ad aumentare;

- riduzione di massa, ingombro e utilizzo di potenza elettrica a bordo satellite con conseguente diminuzione dei costi;
- facile scalabilità e configurabilità delle funzioni da implementare;
- immunità alle interferenze elettromagnetiche (EMI) sia non volute che provocate (*jamming*).

Un ultimo elemento che descrive l'opportunità di supportare ed essere partecipi allo sviluppo di tale tecnologia è che l'attuale mercato spaziale non ha ancora sviluppato in maniera concreta la tecnologia ottica e fotonica, che risulta, al momento, limitato solo a alcune iniziative come quella dello EDRS e poche altre. Questo consente al contesto scientifico, tecnologico ed industriale italiano di essere parte sin da subito della "nuova iniziativa" tecnologica che l'Europa e il Mondo vuole affrontare con le tecnologie ottico-fotoniche, che potrebbero veramente rivoluzionare molti concetti e approcci che sono attualmente utilizzati per la progettazione, lo sviluppo e l'implementazione di sistemi spaziali.
La stessa possibilità di poter connettere tra loro sistemi satellitari oggi intrinsecamente segregati (reti satellitari dedicate a particolari servizi che non parlano tra loro) e connetterli anche con le reti terrestri, è una opportunità da non perdere per le notevoli ricadute che si possono avere e dal fatto che questo potrebbe sicuramente aprire il mercato a nuovi operatori oggi impensabili nel mercato spaziale.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

La definizione di una *roadmap* di sviluppo tecnologico, che tenga conto delle opportunità offerte dalla tecnologia ottica e in linea con le varie iniziative che sia l'ESA che l'ASI, nonché vari enti di ricerca sia accademica che industriale, stanno portando avanti (nuovi *frame* tecnologici, ricerche specializzate e quant'altro), è necessaria e deve essere definita e condivisa con i vari Paesi Membri dell'U.E., guardando anche al di fuori di questa in una visione globale.
Il primo modello di *business*, come anche dimostrato dalle iniziative attuali, parte sicuramente da quello istituzionale in grado di fare da volano e iniziatore delle applicazioni basate sulla tecnologia ottica: in questo l'ASI, il Ministero dell'Università e della Ricerca (MIUR) ma anche il Ministero della Difesa giocano un ruolo deciso e decisivo!
Questo consentirà di stimolare, a seguire, sicuramente l'interesse del mercato commerciale come già da qualche tempo avviene nell'ambito delle reti terrestri in fibra ottica (in pratica quella che porta nelle nostre case l'accesso ad Internet ad alta velocità).
In una visione futura è sicuramente immaginabile un mercato delle telecomunicazioni che comprenda, con soluzione di continuità, l'accesso ai dati e ai servizi oggi prerogativa esclusiva delle reti terrestri fisse e mobili anche da satellite in maniera del tutto trasparente per gli utenti finali. Questo rappresenta il mercato del futuro per le telecomunicazioni e non solo, sdoganando in maniera definitiva l'accesso al satellite dall'essere una capacità relegata solo ad alcuni ambiti molto selezionati e ristretti. Il nostro Paese vuole "essere della partita", partecipando attivamente a tutte le iniziative e opportunità europee e non solo, che stanno stimolando e favorendo la crescita tecnologica dell'ottico e del fotonico anche e soprattutto per lo spazio.

STATO DELL'ARTE IN ITALIA E ALL'ESTERO

L'idea di pensare la tecnologia ottica e fotonica per lo spazio è ormai da tempo nell'interesse di molti enti sia europei che internazionali.

La stessa Agenzia Spaziale Europea sta investendo da diversi anni su tali tecnologie per mezzo di molteplici iniziative di ricerca in cui ha cercato, e cerca, di stimolare lo sviluppo di soluzioni in grado di sopperire all'ostilità che l'ambiente spazio presenta. Ultima delle sue iniziative si è concretizzata con il *frame* di finanziamenti in ambito telecomunicazioni (*ARTES*) denominato *SciLight*.

In tale *frame* diversi progetti e studi sono stati finanziati per sviluppare, prevalentemente, quei dispositivi e sottosistemi che garantiscono funzionalità e prestazioni adeguate quando operativi nello spazio e dallo spazio.

Oggi, questa iniziativa sta per sfociare in altre che hanno lo scopo di presentare progetti e missioni operative in cui, effettivamente, le tecnologie ottiche e fotoniche possano dimostrare la loro reale capacità in missioni di volo reali e più vicini alle esigenze della Società e dei Consumatori europei: il primo passo vedrà, infatti, la realizzazione di dimostratori di volo (*In-Orbit Demonstrator* - IOD) che renderanno possibile la verifica reale e in situazione di utilizzo delle tecnologie sviluppate in tal senso. Questo rappresenterà, inoltre un forte stimolo per gli Operatori Satellitari a guardare con maggior fiducia e confidenza a questa tecnologia così dirompente ed efficace, provandola essi stessi in una situazione quasi-reale.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

La comunità scientifica e industriale coinvolta nelle tecnologie ottico-fotoniche sta da tempo lavorando su tali temi attingendo a finanziamenti molto variegati e, molte volte, reindirizzati da altri settori. Ora è arrivato il momento di "drizzare il tiro" e pensare a finanziamenti e investimenti concreti nella direzione di tali tecnologie.

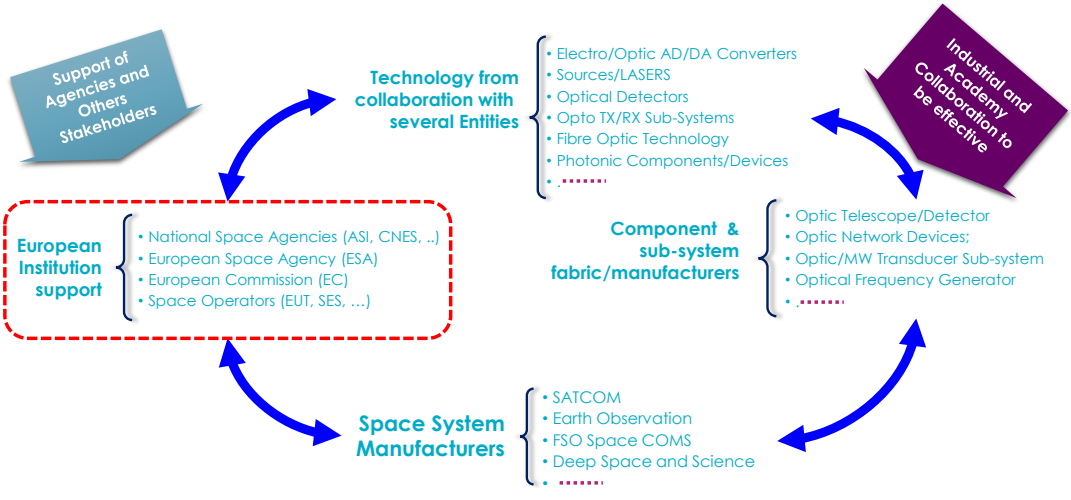


FIG. 24.4 ROADMAP DI SVILUPPO COLLABORATIVO PER LA TECNOLOGIA OTTICO-FOTONICA

In figura 24.4 è rappresentato un possibile modello di cooperazione tra enti di ricerca e produttivi con le istituzioni finanziatrici, per generare e gestire un "circolo virtuoso" che porti in poco tempo ad essere alla pari con altre realtà europee già avviatesi su tale percorso (ove naturalmente questo fosse necessario) e a diventare attori primari di questa innovazione "epocale" in campo spazio.

Come ordine di grandezza di risorse economiche necessarie per supportare a livello nazionale lo sviluppo delle tecnologie ottiche-fotoniche per lo spazio e poter arrivare, conseguentemente, allo sviluppo di una missione di dimostrazione in volo (IOD), si può considerare un *range* economico compreso tra 80 e 100 milioni di euro da suddividere tra i vari sotto-temi che compongono la tecnologia nel suo insieme.

>SOCI AIRI<

SOCI SOSTENITORI

BRACCO
CNR – Consiglio Nazionale delle Ricerche
ENI
MAPEI
PIRELLI

ORGANIZZAZIONI IMPRENDITORIALI

CONFINDUSTRIA
FARMINDUSTRIA
FEDERCHIMICA
UNIONCAMERE

ISTITUTI FINANZIARI

INTESA SAN PAOLO

ENTI PUBBLICI DI RICERCA E UNIVERSITÀ

AREA SCIENCE PARK
ENEA
INAIL
INSTM
POLITECNICO DI TORINO - CHILAB
SCUOLA NORMALE SUPERIORE DI PISA
UNIVERSITÀ DI PISA
UNIVERSITÀ DI ROMA TOR VERGATA

INDUSTRIE E CENTRI DI RICERCA

BRACCO IMAGING
BREMBO
CENTRO RICERCHE CAMOZZI
CENTRO RICERCHE FIAT
CENTRO RICERCHE E STUDI DEI LAGHI
CETMA
CIRA
COLOROBBIA CONSULTING
COMSOL
DIASORIN
DOMPÉ
EDISON
ELETTRA SINCROTRONE TRIESTE
EMA - EUROPEAN MICROFUSIONI AEROSPAZIALI
ENEL GREEN POWER
ERICSSON TELECOMUNICAZIONI
FINCANTIERI
FONDAZIONE BRUNO KESSLER
GEWISS
INNOVHUB STAZIONI SPERIMENTALI PER L'INDUSTRIA
ISAGRO
ITALCEMENTI
IVECO
JABIL CIRCUIT ITALIA
LFOUNDRY
MENARINI SILICON BIOSYSTEMS
NOVAMONT
KILOMETRO ROSSO
PIRELLI TYRE
SAES GETTERS
SAIPEM
SMILAB
STMICROELECTRONICS
SYNDIAL
THALES ALENIA SPACE ITALIA
VERSALIS

PMI, LABORATORI, START UP INNOVATIVE

ASSING
COSBERG
ECOR RESEARCH INTERNATIONAL
EDAN TECHNOLOGY
EIDON LAB
GIBERTINI ELETTRONICA
INGENIA & PARTNERS
LABORATORI ARCHA
MARITIME TECHNOLOGY CLUSTER FVG
PLASTICA ALFA
SABACOM ENGINEERING
SERVICE GROUP R&D
TECHNETIC ITALIA

SOCIETÀ DI CONSULENZA

AYMING ITALIA
STUDIO TRIBUTARIO E SOCIETARIO DELOITTE SOCIETÀ TRA PROFESSIONISTI
FINSERVICE
PWC TLS
WARRANT HUB

L'industria italiana e il sistema della ricerca vanno operando in un quadro di riferimento aperto e a carattere internazionale.
Per questo la funzione divulgativa e propositiva di Airi si articola attraverso alcuni principali canali di partecipazione:

- Occasioni di incontro tra associati per lo scambio di informazioni e networking;
- L'elaborazione di studi e report periodici sui più attuali temi tecnologici e gestionali;
- Lo sviluppo di progetti e relazioni a livello nazionale e internazionale.

In questo quadro i **Gruppi di lavoro** favoriscono, con il contributo degli associati, l'aggiornamento, lo scambio di conoscenze e le buone prassi nella ricerca industriale, svolgono analisi ed elaborano indagini e proposte su tematiche di specifico interesse per la ricerca e l'innovazione.

- **La tecnologia e il suo trasferimento:** delinea le prospettive di sviluppo industriale del Paese nel breve-medio periodo. Monitora i cambiamenti tecnologici nei modi di produzione dei beni e servizi in corso con la quarta rivoluzione industriale, supervisiona i team di studio settoriali delle Tecnologie Prioritarie per l'Industria, promuove lo sviluppo e l'applicazione delle tecnologie abilitanti (KETs), avendo sempre presente il confronto tra Sviluppo Tecnologico e Sostenibilità complessiva.
- **Ricerca europea e funding:** elabora pareri della ricerca industriale italiana sui Programmi Quadro UE, promuove iniziative progettuali per sostenere la centralità delle KETs, la responsabilità e l'etica della Ricerca, la cultura dell'Open science & Innovation.
- **Pubblic affairs e agevolazioni alla ricerca industriale**: segue la programmazione nazionale degli incentivi, con l'obiettivo di formulare pareri tecnici su specifici aspetti gestionali e cura i rapporti con le Istituzioni ed i Ministeri di riferimento.
- **Education, giovani, ricerca e industria**: elabora iniziative per promuovere la cultura, la passione e lo sviluppo di competenze dei futuri ricercatori dell'industria.

Ogni anno Airi organizza due principali **eventi istituzionali**:

- La **Giornata Airi per l'Innovazione Industriale** che verte su aspetti innovativi dell'industria e affronta temi trasversali di interesse per i settori di punta della R&S industriale.
- **NanoInnovation**, l'unico grande evento internazionale in Italia dedicato alle nanotecnologie ed alla loro integrazione con le altre tecnologie abilitanti.

Inoltre, Airi collabora attivamente alla definizione di **conferenze, seminari e workshops** sui più attuali temi della ricerca e innovazione, a livello nazionale ed internazionale. Tiene per i propri associati incontri di aggiornamento con referenti delle istituzioni pubbliche sulle politiche, le leggi ed i programmi di sostegno alla R&S.

Tutte le iniziative, gli eventi, le analisi e gli studi su
www.airi.it

La X Edizione de "Le innovazioni del prossimo futuro: tecnologie prioritarie per l'industria" si presenta quest'anno in una nuova veste editoriale, essendo composta da due volumi: il primo rivolto alla descrizione degli scenari di riferimento 9per nove settori di primaria importanza per il settore produttivo del Paese, il secondo invece dedicato alla descrizione specifica di 105 Tecnologie, sulle quali le aziende italiane stanno investendo e che, se sviluppate con successo, rappresentano un mezzo per innovare anche in settori diversi da quello in cui si sono generate. Infatti, emerge in questa X Edizione la trasversalità e la necessità di integrazione delle singole tecnologie come strumento necessario per affrontare le grandi problematiche del nostro tempo. Tutto ciò avendo come base comune l'idea che un concetto moderno di Innovazione può essere sviluppato solo attraverso una opportuna integrazione di tre valori fondamentali: quello economico, quello ambientale e quello sociale, in pieno accordo anche con l'impostazione strategica della nuova programmazione di Horizon Europe.

Alla realizzazione di questi due volumi hanno collaborato oltre 180 ricercatori provenienti dai più importanti gruppi industriali ed istituzioni di ricerca pubblica italiani, che hanno preso in considerazione 9 Settori produttivi: Tecnologie Digitali, Microelettronica e Semiconduttori, Energia, Chimica, Farmaceutica e Biotecnologie per la Salute, Trasporti, Spazio, Beni strumentali ed Ambiente.

Per ogni settore, oltre al quadro generale (Vol. I) che lo caratterizza (imprese, mercato, occupazione, tendenze e criticità, investimenti in R&S), vengono presentate (Vol. II) delle schede che descrivono le singole tecnologie sulle quali le aziende italiane intendono concentrare risorse economiche ed intellettuali nel breve-medio periodo. Lo studio complessivo è stato coordinato da Airi che da oltre trenta anni effettua periodicamente tale analisi, al fine di realizzare non solo uno strumento di lavoro e approfondimento per le imprese, ma anche una visione complessiva utile a ricercatori, economisti, Università, Enti Pubblici di Ricerca, Pubbliche Amministrazioni, che possono così approfondire in quali direzioni si svilupperanno le principali linee tecnologiche industriali nel prossimo futuro.

www.airi.it

Isbn 978-88-98935-30-7
9 788898 935307

Euro 25,00