AIRI - ASSOCIAZIONE ITALIANA PER LA RICERCA INDUSTRIALE

LE INNOVAZIONI DEL PROSSIMO FUTURO

TECNOLOGIE PRIORITARIE PER L'INDUSTRIA

X edizione - 2020





SETTORE SPAZIO





Airi ASSOCIAZIONE ITALIANA PER LA RICERCA INDUSTRIALE

ThalesAlenia Space
a Thales / Leonardo company

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

SETTORE SPAZIO

Airi – Associazione Italiana per la Ricerca Industriale

Le innovazioni del prossimo futuro
Tecnologie Prioritarie per l'Industria
X edizione – 2020
SETTORE SPAZIO

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 luglio 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

Membri del Gruppo di lavoro		**7**
Prefazione		**9**
PARTE 1 >PROFILO DI SETTORE<		**10**
PARTE 2 >TECNOLOGIE<		**28**
Tecnologia prioritaria n. 1	Tecnologie per missioni gravimetriche	**29**
Tecnologia prioritaria n. 2	Tecnologie per l'esplorazione solare	**34**
Tecnologia prioritaria n. 3	Strutture avanzate ultraleggere e adattive	**38**
Tecnologia prioritaria n. 4	Robotica e intelligenza artificiale: un binomio strategico nell'ambito dell'esplorazione spaziale	**46**
Tecnologia prioritaria n. 5	Tecnologie per il rientro atmosferico e l'esplorazione	**52**
Tecnologia prioritaria n. 6	Sistemi avanzati per integrazione, rifornimento, trasporto e rimozione satelliti/detriti in orbita	**71**
Tecnologia prioritaria n. 7	Tecnologie e applicazioni per la sicurezza nello spazio	**76**
Tecnologia prioritaria n. 8	Tecnologie per antenne a bordo di satelliti	**86**
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	**90**
Tecnologia prioritaria n. 10	Tecnologie per radar da osservazione della terra	**101**
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	**107**
Tecnologia prioritaria n. 12	Tecnologie avanzate basate su intelligenza artificiale per il trattamento di immagini radar	**111**
Tecnologia prioritaria n. 13	Tecnologie di cybersecurity per la protezione dei sistemi spaziali	**117**
Tecnologia prioritaria n. 14	Orologi atomici spaziali "next generation"	**124**
Tecnologia prioritaria n. 15	Tecnologie per la propulsione spaziale: elettrica, avanzata, ramjet/scramjet (volo ipersonico e 2 stage 2 orbit)	**127**

	15.1 Propulsione elettrica	**128**
	15.2 Propulsione avanzata	**137**
	15.3 Propulsione ramjet/scramjet	**146**
Tecnologia prioritaria n. 16	Sviluppo nuovi propellenti solidi	**151**
Tecnologia prioritaria n. 17	Tecnologie per l'accesso allo spazio	**154**
	17.1 Tecnologie per veicoli di lancio parzialmente riutilizzabili	**157**
	17.2 Tecnologie per piccoli veicoli di lancio	**159**
	17.3 Tecnologie per l'estensione dei servizi ai carichi utili	**161**
	17.4 Tecnologie per il lancio da piattaforma mobile	**163**
	17.5 Tecnologie per la sicurezza e la telemetria	**165**
Tecnologia prioritaria n. 18	Serbatoi e strutture di nuova generazione per lanciatori e veicoli spaziali	**167**
	18.1 Grandi serbatoi a bassa pressione e strutture di connessione in composito linerless	**169**
	18.2 Piccoli serbatoi in composito per gas ad alta pressione	**171**
	18.3 Tecnologie di saldatura per componenti in pressione	**173**
	18.4 Tecnologie di controllo olistico e di health monitoring	**177**
	18.5 Strutture ad alta stabilità dimensionale di tipo anisogrid	**180**
Tecnologia prioritaria n. 19	Additive manufacturing	**182**
	19.1 Le tendenze applicative	**186**
	19.2 Le tecnologie di processo	**191**
	19.3 La frontiera dei materiali	**195**
Tecnologia prioritaria n. 20	Tecnologie flessibili di telecomunicazione per colmare il divario digitale e per applicazioni governative	**207**
Tecnologia prioritaria n. 21	Tecnologie di guida e navigazione autonomi tramite elaborazione di immagini	**212**
Tecnologia prioritaria n. 22	Controllo ambientale evoluto	**216**
Tecnologia prioritaria n. 23	Stoccaggio e distribuzione di energia	**225**
Tecnologia prioritaria n. 24	Ottica e fotonica per lo spazio: la nuova frontiera per innovare alla velocità della luce	**228**

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
	Stefano Cesare
	Massimo Chiampi
	Cosimo Chiarelli
	Carlo Ciancarelli
	Salvatore Corvo
	Maurizio Costa
	Martina Giraudo
	Arturo Intelisano
	Piergiorgio Lanza
	Ilaria Locantore
	Francesco Lumaca
	Andrea Merlo
	Mauro Montabone
	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
CIRA	**Stefania Cantoni**
	Antonio Concilio
	Francesco Battista

segue>>

CIRA	**Felice De Nicola**
	Ignazio Dimino
	Roberto Fauci
	Nunzia Favaloro
	Roberto Gardi
	Marco Marini
	Mario Panelli
	Giuseppe Rufolo
	Domenico Tescione
	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

Un ringraziamento particolare va a chi con ammirevole entusiasmo ha contribuito alla realizzazione di questa pubblicazione.
A Ernesto Cucchi per la realizzazione della grafica di copertina, a Francesca Metrangolo per il contributo sui contenuti di Comunicazione, ad Anne Techel per la revisione delle bozze.

Prefazione

Il presente volume fornisce un'ampia panoramica sulle tecnologie del settore Spaziale più rappresentative e promettenti per il potenziale impatto che avranno sul futuro sviluppo competitivo delle industrie nazionali del settore e sull'economia del Paese, e perciò, come tali, considerate a pieno titolo *prioritarie* in un orizzonte temporale di breve-medio termine.

La ricerca tecnologica spaziale assume oggi un ruolo sempre più importante e pervasivo, con notevoli implicazioni in vari ambiti che vanno dalla sicurezza alla difesa, dalla protezione civile al monitoraggio ambientale e degli ecosistemi, dalle telecomunicazioni alla telemedicina, alla produzione di nuovi materiali.

In un contesto così trasversale, multiforme e complesso, il volume nella prima parte offre un'analisi sintetica dei principali scenari strategici ed economici di settore, mentre nella seconda riporta, con uno stile non specialistico ma rigoroso, l'analisi descrittiva di un cluster di 24 tecnologie selezionate da un Gruppo di Lavoro nazionale composto da esperti industriali, accademici e dei centri di ricerca, coordinato da Thales Alenia Space.

A tutti loro va il mio più vivo ringraziamento per l'impegno e la pazienza profusi per riuscire a portare a termine un lavoro di non facile sintesi, data la complessità degli argomenti e la loro rapida evoluzione, nel tentativo di fornire ad un pubblico, sia istituzionale che privato, uno strumento in grado di offrire una visione diretta e di insieme che aiuti a comprendere il valore e le applicazioni delle tecnologie spaziali quale elemento di progresso e leva imprescindibile per lo sviluppo economico del nostro Paese.

Leonardo Mazzini
Chief Technical Officer
di Thales Alenia Space Italia

PROFILO DI SETTORE

>PARTE 1<

PROFILO DI SETTORE

Negli ultimi anni, con l'entrata in vigore del Trattato di Lisbona (TFUE), lo **Spazio** ha acquisito una importanza crescente a livello politico sia in Europa sia in Italia. Di conseguenza è notevolmente aumentata l'attenzione nel definire e attuare una politica Spaziale di prestigio per consentire all'Europa di giocare su scala mondiale un ruolo analogo a quello delle altre potenze spaziali.

Alle attività spaziali ormai è unanimemente riconosciuta una grande **rilevanza strategica**, alla luce della grande varietà delle ricadute generate in termini di garanzia di accesso e utilizzo dello Spazio, di crescita della conoscenza, di sviluppo tecnologico, di innovazione, di sicurezza, di ritorni economici e di crescita della competitività industriale.

In particolare, viene riconosciuto il ruolo trainante (diretto ed indiretto) di questo settore in tutte le economie dei Paesi più industrializzati dovuto a un potenziale in grado di fornire un impulso considerevole alla **ricerca scientifica** e al **progresso tecnologico**, fattori fondamentali dello sviluppo economico e industriale delle società più avanzate. Il settore spaziale, a livello globale, acquista una sempre maggiore importanza grazie anche alla influenza dello Spazio sui temi che quotidianamente vengono affrontati dai media. Tra questi citiamo a titolo di esempio: i cambiamenti climatici, le telecomunicazioni, la sicurezza sia della popolazione sia degli stessi satelliti.

Lo Spazio viene considerato uno strumento che può contribuire, in maniera sostanziale, a affrontare i cambiamenti globali ed è infatti strumentale per fornire i servizi necessari a rispondere alle diverse esigenze che emergono sempre più sia a livello governativo sia dei cittadini. Si tratta, quindi, di uno strumento essenziale che consente anche di trovare soluzioni a problematiche sociali sensibili e di indubbia attualità, quali l'Ambiente, il Clima, il Controllo del Territorio e degli Spazi Aeromarittimi, la Sicurezza e la Difesa.

Quanto detto, conferma e rafforza la necessità di avere una comunità scientifica, accademica ed un comparto industriale (incluso le PMI) di valore adeguato al ruolo desiderato per il nostro Paese, tradizionalmente uno dei più importanti nel novero delle potenze spaziali. L'Italia ha una lunga storia di esplorazione spaziale e nel 1964 è stato il terzo Paese al mondo a lanciare e gestire un satellite in orbita. La nascita dell'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) nel 1988, infatti, non costituisce l'inizio dell'impegno italiano nel settore Spaziale, ma esprime la necessità di un coordinamento unitario delle attività di ricerca e industriali, che erano andate sviluppandosi a partire dagli anni '60. **L'Industria spaziale nazionale**, pertanto, gioca un ruolo significativo in diversi ambiti e domini applicativi delle attività spaziali europee e mondiali, grazie anche al coinvolgimento attivo di **Università e Centri di Ricerca** e di una nutrita filiera di **piccole e medie imprese** specializzate. Come esempi importanti, ma non esaustivi, possono essere citati la progettazione, lo sviluppo e la costruzione di:

- **Satelliti Scientifici ed Applicativi** nei domini delle Telecomunicazioni, dell'Osservazione della Terra e della Navigazione;
- **Infrastrutture Spaziali Abitate** (Moduli Pressurizzati);
- **Sistemi di Lancio e Trasporto Spaziale**;
- **Apparati, Antenne, Componenti ed Equipaggiamenti**, elettronici e meccanici, sia di bordo che di terra;
- **Sistemi per la Protezione e la Sicurezza dello Spazio**, ovvero l'integrazione di infrastrutture, assets nazionali e capacità operative esistenti e futuri per la previsione e il monitoraggio di collisioni con detriti e oggetti spaziali, di frammentazioni di oggetti spaziali e del loro rientro incontrollato verso la Terra, al fine di contribuire ad assicurare la disponibilità a lungo termine delle infrastrutture e dei mezzi spaziali europei;
- **Sistemi Software** sicuri, ad elevato grado di affidabilità, specifici per il settore spaziale.

Per potersi rapportare efficacemente al nuovo quadro mondiale ed europeo, assicurando anche all'Italia un ruolo competitivo nelle nuove sfide internazionali, è fondamentale ottimizzare il **coordinamento di tutte le componenti nazionali**.

In tale contesto si inquadra la riorganizzazione della *Governance* nazionale per lo Spazio e l'Aerospazio, legge n.7/2018 che fornisce disposizioni concernenti la organizzazione e il funzionamento dell'ASI, conferendo al presidente del Consiglio dei Ministri l'alta direzione, la responsabilità politica generale e il coordinamento delle politiche di tutti i Ministeri interessati ai programmi spaziali. A questo scopo la legge istituisce, presso la Presidenza del Consiglio, il "**Comitato interministeriale per le politiche relative allo Spazio e all'Aerospazio**" (**COMINT**) e gli attribuisce il compito di elaborare le strategie governative e In-

dustriali dei settori spaziale e aerospaziale. Il **COMINT** definisce gli Indirizzi del Governo in materia spaziale e aerospaziale e lavora con l'obiettivo di tutelare e rafforzare il ruolo primario che l'Italia ha saputo conquistare in virtù delle proprie capacità scientifiche, tecnologiche e Industriali nazionali, ma anche per capitalizzare gli investimenti passati e futuri del Paese, senza trascurare la questione chiave relativa al controllo reale delle capacità tecnologiche e produttive esistenti sul territorio nazionale, grazie ai continui e ingenti investimenti degli ultimi decenni.

Il controllo di tali capacità è più che mai strategico, sia per consentire all'Italia di rimanere un *player* primario nel settore Spaziale, sia per potersi avvantaggiare delle **ricadute tecnologiche e industriali** che ne derivano.

Lo Spazio, dunque, non è soltanto un settore specializzato, a prevalente connotazione tecnico-scientifica, ma è orientato sempre più alla fornitura di applicazioni e servizi, indirizzati soprattutto al benessere dei cittadini. Infatti, i programmi spaziali, utilizzando i dati satellitari disponibili ed integrando in maniera crescente i recenti sviluppi scientifici e tecnologici, assumono una maggiore rilevanza proprio in rapporto alle crescenti possibilità di sviluppare applicazioni e di fornire **servizi utili al cittadino, alle Imprese e alle Pubbliche Amministrazioni,** in risposta ad una domanda pubblica e privata in costante crescita. **L'Agenzia Spaziale Italiana (ASI)** è l'Agenzia pubblica preposta a definire, coordinare e gestire programmi spaziali nazionali e la partecipazione italiana a progetti spaziali europei e internazionali, sotto la supervisione del Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca (MIUR) e in conformità con gli indirizzi governativi.

Il sistema spaziale italiano è composto da molti e diversificati *stakeholders* e l'ASI mantiene rapporti con tutti i gruppi di interesse – Università e Centri di Ricerca spaziali, imprese, *cluster* regionali, Ministeri a più titoli coinvolti nel settore, Enti locali – allo scopo di promuovere e coordinare la ricerca scientifica, lo sviluppo tecnologico e favorire la crescita di infrastrutture spaziali al servizio del cittadino.

L'ASI gestisce la realizzazione dei conseguenti programmi nazionali e, al tempo stesso, rappresenta il Governo italiano presso **l'Agenzia Spaziale Europea (ESA)** per definire la partecipazione italiana a programmi qualificati dell'ESA, con l'intento di ottenere ruoli e ritorni di qualità per la comunità spaziale nazionale. L'ASI, inoltre, partecipa ai diversi gruppi di lavoro e comitati relativi allo Spazio dell'Unione Europea (ad es. *Space Working Party* per la preparazione del Consiglio Competitività dell'Unione, *Space Policy Expert Group*, Galileo, Copernicus, SST, H2020) e ai lavori degli organismi internazionali multilaterali impegnati nelle attività e nelle **cooperazioni Spaziali,** al fine di assicurare il più proficuo e sinergico sfruttamento degli investimenti nazionali.

I programmi spaziali costituiscono anche un importante veicolo per accrescere la visibilità internazionale dell'Italia ed un utile ausilio alla politica estera nazionale, sia nei *fora* internazionali che nelle relazioni bilaterali con i Paesi avanzati o a sostegno dei Paesi in via di sviluppo. Grazie anche all'impegno dell'Agenzia Spaziale Italiana, l'Italia ha assunto un ruolo di primo piano nel panorama tecnologico, scientifico ed Industriale del settore, sia con specifiche **iniziative nazionali**, sia attraverso la citata attiva **partecipazione in ESA** e a **programmi congiunti con la NASA o altre Agenzie Spaziali**. L'ASI ha infine il compito istituzionale di promuovere e diffondere la cultura aerospaziale attraverso iniziative dedicate al grande pubblico e, in particolare, ai giovani che con sogni ed entusiasmo costruttivo sono il motore indispensabile dell'evoluzione in ambito Spaziale.

MERCATO

Contesto globale

Nel 2017 i **finanziamenti istituzionali mondiali** nel settore spaziale si sono attestati sui **58 B€**, con una crescita media su 5 anni del 2,9%[1], con il settore pubblico, civile e militare, che si afferma ancora come il maggiore "cliente" per il settore spaziale. Gli investimenti sono concentrati in **USA, Russia, Europa, Cina e Giappone**, con circa il **92%** dell'investimento mondiale istituzionale. Questo indica che il ruolo governativo è essenziale in quanto fonte primaria di finanziamento sia per le attività di R&S, sia per quelle legate a prodotti e servizi. È importante sottolineare che il numero dei Paesi che investono nello spazio è in costante aumento. Questo dimostra che il settore è estremamente dinamico e i Governi considerano gli investimenti, nelle applicazioni e tecnologie spaziali, importanti per supportare le politiche nazionali e lo sviluppo scientifico e tecnologico.

La novità recente è l'entrata nel mercato dello spazio di **nuovi soggetti privati** (es. SpaceX, Blue Origin, Virgin Galactic), *player* della *New Economy* come Google e Facebook, e Venture Capital. Gli investimenti privati nel 2018 hanno raggiunto i 3,2 B$ (+680 B$ rispetto al 2017), di cui 80% in USA[2] .

Gli USA sono i maggiori investitori pubblici con circa 34 B€ investiti nelle attività spaziali (civili e per la difesa), anche se, rispetto al passato, si evidenzia una stagnazione negli investimenti. Nel 2013 infatti, l'investimento pubblico USA rappresentava il 54% dell'investimento mondiale nel settore, ora rappre-

1 Eurospace and Euroconsult Government Space Programs 2017
2 Start-up Space 2019, Bryce Space and Technology

senta circa il 58%. Analogamente per la Russia che fa registrare nel 2017 un investimento pubblico di 2,9B€ con una importante riduzione rispetto agli anni 2012-2013. Anche per quanto riguarda la Cina, l'investimento nel programma spaziale si attesta intorno ai 4B$ e si attesta sullo 0,076% del suo PIL. In Europa gli investimenti governativi nello spazio per il 2017 sono stati di circa 9,7B€, con un tasso di crescita del 6,8% dal 2013.

Ad eccezione degli USA, Russia, Francia, Cina, Giappone e India, l'incidenza del *budget* spaziale sul PIL è, per la maggior parte delle nazioni, inferiore al 0,05% nel 2017.[3] Si prevede che probabilmente ci sarà un'ulteriore crescita degli investimenti nazionali in attività spaziali; questo si ricollega anche alle aspettative di governi e imprenditori sugli effetti positivi che gli investimenti nel settore spaziale hanno sulla crescita economica e sugli impatti sociali che possono portare.

Nel 2013 il valore economico del mercato della ***Space Economy*** ha raggiunto la cifra di 280 miliardi di euro, con una proiezione per il 2030 pari a circa 500 miliardi. Il valore del mercato mondiale *upstream* è stimato in 28.4B€ nel 2017, con un tasso globale di crescita dal 2013 del 10,8%, mentre il Valore del mercato mondiale *downstream* e dei segmenti correlati è stimato in 235B€ nel 2017 con un tasso globale di crescita del 10,9% dal 2013.

Contesto europeo

I principali attori presenti nel settore spaziale europeo sono **l'Agenzia Spaziale Europea (ESA), l'Unione Europea (UE) ed i rispettivi Paesi Membri**. L'Europa, attraverso l'azione coordinata di UE ed ESA, occupa oggi il secondo posto al mondo per ampiezza del bilancio pubblico destinato allo spazio con strutture e programmi che coinvolgono diversi Paesi Europei (27 in UE e 22 in ESA).

Per quanto riguarda l'aspetto economico, gli investimenti pubblici europei nel settore spaziale (ESA, UE, Eumetsat e Stati) negli ultimi anni si sono attestati intorno ai 9,7B€ nel 2017 e nel 2018. A questi vanno aggiunti circa 1,8B€, nel periodo 2014-2018, di investimenti privati di cui 560€ Milioni derivanti da *start-up*.

Nel 2013, considerando sia gli investimenti nazionali sia le contribuzioni in ambito ESA ed EUMETSAT, la Francia è stata il maggior investitore con circa 2,1B€, seguita dalla Germania (circa 1,5B€), Italia (circa 0,8B€) e UK (circa 0,6B€). Negli ultimi anni diversi altri Paesi europei hanno dimostrato il loro interesse nel settore investendo in programmi sia a livello nazionale sia a livel-

3 OECD (2019), The Space Economy in Figures: How Space Contributes to the Global Economy, OECD

lo ESA. Da citare, ad esempio, la recente costituzione dell'Agenzia Spaziale del Regno Unito e della Polonia. Il valore del mercato europeo *upstream* è stimato in 8,7€ miliardi nel 2017 (circa 30% del mondiale), con un tasso globale di crescita, dal 2013, del 6,2%.

Il valore della sola parte commerciale del mercato europeo *downstream* nel 2017 è stata di circa 55€ miliardi ovvero il 25% di quello mondiale con i settori delle telecomunicazioni e navigazione che rappresentano l'80% del mercato e le osservazioni della terra il 20%.

L'**UE**, attraverso la **Commissione**, è uno dei maggiori contribuenti ai programmi spaziali Europei e il maggiore utilizzatore istituzionale dell'industria europea dei sistemi di lancio. Lo Spazio è infatti uno dei settori sempre protagonisti dei *round* di finanziamento dei programmi quadro dell'Unione ed è stato destinatario di 1,2 Mld€ circa nel sesto *Framework Programme* (FP6), relativo agli anni 2002/2006 e di più di 1,4 miliardi di euro nel FP7 (2007/2013). Nel periodo 2014-2020 l'UE ha investito più di 12 Mld€ nei programmi faro **Galileo** e **Copernicus** e nelle attività spaziali di **Horizon 2020**.

Nel prossimo ciclo 2021-2027, la Commissione ha già proposto di aumentare l'investimento al programma spaziale 16 B€, per garantire continuità e innovazione ai suoi programmi faro e 15 B€ per il *Cluster 'Digital, Industry and Space'* nel programma di ricerca ***Horizon Europe***.

Contesto nazionale

L'Italia, membro fondatore dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA), è il terzo maggiore contribuente, dopo la Germania e la Francia e fra i primi Paesi al mondo per investimenti in tutti i più importanti settori di attività Spaziali (Osservazione della Terra, Osservazione dell'Universo, Telecomunicazioni, Trasporto spaziale, Abilità umana nello spazio, Medicina e biotecnologie, Navigazione e localizzazione, Tecnologie e trasferimento tecnologico). Questa forte diversificazione – seppure con impegni finanziari molto differenziati – ha reso possibile una vasta acquisizione di competenze in quasi tutti i settori. Da notare che i grandi paesi europei non investono in tutte le aree dello Spazio. L'Industria nazionale di settore è una realtà rilevante, anche per i benefici che apporta all'intero sistema produttivo in termini di rafforzamento tecnologico, determinato dagli alti investimenti in ricerca e sviluppo. L'Industria Spaziale, infatti, registra la maggiore intensità di ricerca, sia nel confronto con l'intero sistema manifatturiero nazionale, sia con quello delle aziende *high-tech*. Nell'*up-stream* spazio, il rapporto tra spese per ricerca e valore della produzione è dell'11%, mentre è del 5,1% nell'*high-tech* e dello 0.9% nell'intera manifattura.

L'Italia ha una gamma completa di competenze, dalle Telecomunicazioni al Posizionamento (Galileo, info-mobilità per sicurezza, salute, trasporti), all'Os-

servazione della Terra (COSMO-SkyMed e relativi servizi per il territorio), all'Esplorazione e Trasporto Spaziale (ISS, missioni ESA / NASA, sistemi di trasporto Vega, robotica, logistica di volo, ecc…). A tali competenze corrispondono sistemi produttivi integrati, dalla progettazione, alla produzione di materiali speciali, alla realizzazione di prodotti e servizi, alla gestione, sviluppo e distribuzione di dati, articolati nei segmenti di terra, trasporto e orbita/volo.

L'industria spaziale italiana è composta da sistemisti ed integratori di sistemi di grandi dimensioni (LSI) e una serie molto più ampia di piccole e medie imprese (PMI), collegati attraverso una complessa rete di relazioni verticali. Le PMI spaziali italiane operano in tutta la catena del valore, dalle attività di produzione a servizi e applicazioni. Esse rappresentano una componente strategica del settore spaziale, con competenze di eccellenza in settori di nicchia lavorando in contesti internazionali (ESA, UE) e nei mercati extra-UE.

Circa i due terzi delle imprese spaziali italiane (grandi e piccole), operano nel settore manifatturiero, contribuendo alla realizzazione o alla manutenzione di infrastrutture spaziali, mentre il restante terzo fornisce servizi e applicazioni spaziali per gli utenti finali (*downstream*).

L'industria spaziale italiana è composta da circa 250 aziende (di cui solo 150 hanno le attività spaziali come *core business*) con un fatturato complessivo di circa 1,6 miliardi di euro. Un ristretto numero di grandi gruppi dominano il settore, sia in termini di occupazione sia di fatturato. Le esportazioni del settore spaziale rappresentano il 70% del fatturato, di cui oltre la metà esportate in altri paesi dell'UE (con una quota importante di ordini ESA e la collaborazione con la Germania e la Francia). Una relativamente piccola ma crescente quota degli ordini proviene da Paesi al di fuori dell'Unione Europea. L'industria spaziale italiana è diffusa su tutto il territorio, con distretti spaziali e *cluster* che rappresentano, nel settore, uno dei fenomeni più recenti e significativi ancora in forte crescita.

È in corso un'azione a livello nazionale che mira a integrare nei territori, possibilmente per aree specialistiche, le attività di grandi imprese, PMI e soggetti di ricerca (Università, Enti di Ricerca), valorizzando lo specifico e insostituibile ruolo di ogni *stakeholder*, con lo scopo di delineare linee di intervento pubblico, coordinato a livello nazionale e regionale, che massimizzino l'efficacia e l'efficienza della spesa, le sinergie e la sussidiarietà degli investimenti in un'ottica di strategia nazionale. Merita una particolare menzione il ***Cluster* Tecnologico Nazionale Aerospazio** (**CTNA**), del quale fanno parte tutti i Distretti aerospaziali, diverse imprese ed associazioni Industriali, Enti di Ricerca ed ASI ha l'obiettivo di assicurare, in una ottica "meta-distrettuale", l'ottimizzazione delle risorse spese, sugli assi cruciali di sviluppo del settore spazio.

La Piattaforma Tecnologica Spaziale Italiana SPIN-IT

SPIN-IT (*Space Innovation in Italy*) è la piattaforma italiana dedicata allo Spazio, con lo scopo di valorizzare le sinergie fra Industria, Università e Ricerca e favorire il confronto tra i soggetti istituzionali interessati alle attività ed applicazioni spaziali.

SPIN-IT ha l'obiettivo complessivo di contribuire a aumentare la competitività del sistema paese attraverso una mappatura puntuale delle competenze, delle attività della filiera Industriale, di ricerca e scientifiche favorendo il confronto costante tra i soggetti istituzionali interessati.

OCCUPAZIONE

A livello di **occupazione globale** nel settore, è importante evidenziare come negli Stati Uniti l'occupazione nel settore spaziale, abbia fatto registrare una contrazione per il sesto anno consecutivo, con un calo del 3,5% nel 2011-2012, l'anno più recente di cui si ha disponibilità di dati. Diversi fattori hanno contribuito a questi numeri negativi, compresa la fine del Programma *Space Shuttle* nel 2011. In seguito alla recessione vi è stato, infatti, un inasprimento dei bilanci, con la conseguente incertezza sul futuro dei fondi federali destinati ai programmi spaziali. Al contrario, il settore della forza lavoro giapponese è cresciuto dell'11% nel 2012, continua la sua crescita pluriennale dopo aver raggiunto un punto molto basso nel 2008. A titolo di riferimento, vale la pena notare che nel 2013, la Cina occupava circa 26.000 FTE (*full-time equivalent*) e il Giappone circa 7.500 FTE nei rispettivi settori Industriali *upstream*.

Le **attività spaziali in Europa** generano livelli di occupazione pari a circa 230.000 posti di lavoro, la maggioranza dei quali derivanti dal settore *downstream* (ad es. servizi e applicazioni), in particolare il settore delle comunicazioni satellitari. Nel dettaglio i dati parlano di 43.000 posti di lavoro diretti nel settore *upstream* e nel *midstream*. L'Industria manifatturiera produce circa 36.000 posti di lavoro altamente qualificati. Infatti, il settore delle comunicazioni satellitari sostiene i due terzi dei posti di lavoro e contribuisce fortemente a mantenere e sviluppare il *know-how* necessario per garantire la competitività, anche per quello che attiene all'Industria. Nei prossimi anni si prevede che i settori *downstream* – Osservazione della Terra e Navigazione satellitare – contribuiranno fortemente all'aumento di occupazione. La distribuzione dei posti di lavoro nel settore *upstream* tra gli Stati membri dell'ESA mostra un forte posizionamento della Francia seguita da Germania e Italia. In Europa nel 2102 l'occupazione nell'Industria spaziale è aumentata per il settimo anno consecutivo, di una percentuale pari all'1,5%. Nel 2013 l'occupazione totale ha continuato a crescere per raggiungere un livello storico di poco superiore ai 36.000 posti di lavoro. I sei principali Stati membri dell'ESA (Francia, Germania, Italia, Regno Unito,

Spagna e Belgio) forniscono circa il 90% dei posti di lavoro dell'Industria europea dello Spazio. Le PMI contribuiscono con una percentuale pari al 10% nel settore manifatturiero.

Occupazione in Italia

Dal 2014 c'è una tendenza alla crescita dell'occupazione altamente qualificata nel settore che ha raggiunto 6.300 impiegati nel 2017, con quattro grandi aziende che occupano circa l'80% della forza lavoro. In termini di valore della produzione l'ultima analisi del 2015 ha rilevato un ammontare di 1,6B€ (fonte ASI). Questi dati comprendono anche il settore *downstream* (sistemi di servizio a terra, segmento utente e applicazioni), con meno di 1/3 di tutta l'occupazione del settore.

Il *turnover* è fortemente influenzato dalla spesa pubblica in area EU: essa assomma a ben oltre il 50% degli ordinativi ed è da ricollegarsi in massima parte alle commesse ASI e ESA, sia dirette (a *prime*) che indirette (*subcontracts*).

RICERCA E SVILUPPO

È ampiamente noto che la **ricerca scientifica italiana** nel settore spaziale è di altissimo livello, in continuità con quegli scienziati che furono i padri fondatori del settore spaziale italiano.

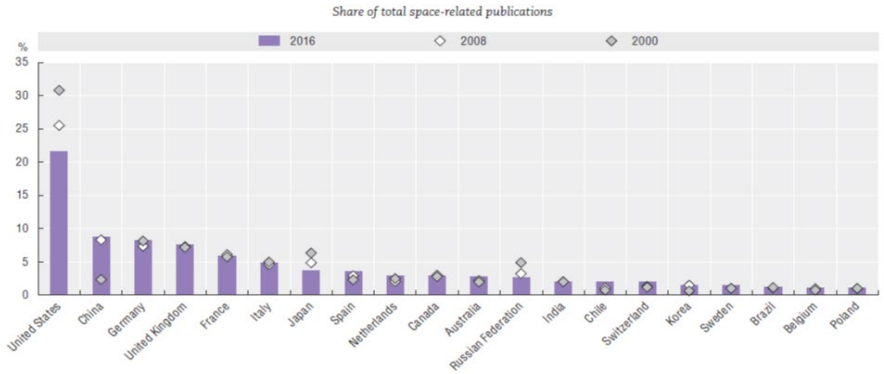
La comunità scientifica italiana ha ottenuto negli ultimi decenni successi senza precedenti nel campo dell'astrofisica e della cosmologia, contribuendo tra l'altro a ricostruire i primi istanti di vita dell'Universo, compiendo passi fondamentali verso la comprensione del fenomeno dei *gamma ray bursts* e delle misteriose sorgenti di raggi gamma. L'ASI ha dato inoltre **importanti contributi all'Esplorazione Spaziale**, costruendo strumenti scientifici che hanno viaggiato con le sonde NASA ed ESA alla scoperta dei segreti di Marte, Giove, Saturno e comete. Come conseguenza, in tutte le principali missioni pianificate per i prossimi anni – da Venere alle comete, fino ai limiti estremi del nostro Sistema Solare – ci sarà un pezzo di Italia.

Dati OCSE del 2019[4] confermano che l'Italia è al sesto posto nel mondo per numero di pubblicazioni scientifiche nel settore spaziale, dopo USA, Cina, Germania, Gran Bretagna e Francia.

4 OECD (2019), *The Space Economy in Figures: How Space Contributes to the Global Economy*, OECD Publishing, Paris, *https://doi.org/10.1787/c5996201-en*

Una recente analisi bibliometrica delle pubblicazioni (si veda figura sotto) afferenti alle 9 missioni a partecipazione italiana nel settore dell'astrofica delle alte energie e delle particelle, mostra che la produzione scientifica nazionale contribuisce ad alzare la qualità della produzione scientifica internazionale in termini di citazioni, *H-index* e *M-index*, con valori quasi sempre molto al di sopra della media del settore Astrofisica e Astronomia dei *data Base Web of Science* (Thomson Reuters) e *Scopus* (Elsevier).

RISORSE ECONOMICHE TOTALI
L'ITALIA INVESTE CIRCA 900 MILIONI DI EURO ALL'ANNO DI FINANZIAMENTO PUBBLICO.



Source: OECD analysis based on Scopus Custom Data, Elsevier, 2018.

INDIRIZZI STRATEGICI A BREVE-MEDIO TERMINE

Il settore spaziale è molto ben strutturato a livello di politiche nazionali e sovranazionali. Data l'elevata strategicità dell'Industria, le ampie ricadute tecnologiche, l'orizzonte temporale di lungo periodo e i notevoli costi, la pianificazione strategica e la definizione degli obiettivi sono molto puntuali. A livello europeo le **linee guida spaziali** sono dettate dagli organismi dell'**Unione Europea** e dall'**ESA**. Tali indicazioni sono recepite, adattate ed integrate poi a livello italiano dall'**ASI**.

L'Unione Europea ha acquisito una competenza nel settore spaziale con il Trattato di Lisbona, e, attraverso la Commissione, è uno dei maggiori contribuenti ai programmi spaziali Europei e il maggiore utilizzatore istituzionale dell'Industria Europea dei sistemi di lancio.

La **Commissione Europea** coopera con l'ESA in numerose iniziative al fine rendere l'Europa più forte e offrire vantaggi ai suoi cittadini. Tale cooperazione ha portato, nel 2016, alla firma del "*Joint Statement on Shared Vision and Goals for the Future of European Space*" i cui obiettivi strategici sono:

- massimizzare l'integrazione dello spazio nella società e nell'economia

dell'Europa, incrementando l'utilizzo delle tecnologie e applicazioni spaziali per supportare le politiche pubbliche;
- promuovere la competitività del settore spaziale europeo, supportando la ricerca, l'innovazione, l'imprenditorialità per la crescita e il lavoro negli Stati membri, e accedere ad una maggiore quota del mercato globale;
- assicurare l'autonomia dell'Europa nell'accesso e utilizzo dello spazio in un contesto sicuro e protetto, e in particolare consolidare e proteggere le proprie infrastrutture.

Per il prossimo **budget 2021-2027**, la Commissione ha proposto un programma spaziale rafforzato con obiettivi ambiziosi:
1. assicurare che l'UE rimanga un *leader* a livello globale nello scenario mondiale: assicurare la continuità e l'evoluzione di **Galileo**, **EGNOS** and **Copernicus**, e sviluppare nuove iniziative per la sicurezza su *Governmental Satellite Communication* (**GOVSATCOM**) e *Space Situational Awareness* (**SSA**);
2. favorire un'Industria spaziale Europea forte ed innovativa: promuovere l'accesso delle PMI al finanziamento del rischio, includendo *start-up* innovative e nuovi modelli di *business*; *partnership* innovative, accesso a impianti di prova e di manifattura, promuovere certificazione e standardizzazione;
3. mantenere autonomo, affidabile e conveniente l'**accesso allo spazio** per l'UE: aggregare la domanda UE dei servizi di lancio; investire in tecnologie innovative quali i sistemi riutilizzabili;
4. stabilire un **sistema di governo unico** e semplice: semplificare la cooperazione tra i diversi attori e istituire l'Agenzia Europea per il Programma Spaziale che, a complemento dell'ESA, supporta la diffusione sul mercato e gioca un maggior ruolo nell'accreditamento in materia di sicurezza.

L'ESA in preparazione delle *Council* a livello Ministeriale ESA di novembre 2019 (SPACE19+), sta discutendo con gli Stati membri una proposta programmatica per rispondere anche agli obiettivi condivisi con la Commissione. In particolare, la proposta ESA per SPACE19+ vale circa € 14 Mld€ per il periodo 2020-2024 e individua quattro aree programmatiche (*Pillars*) per le attività spaziali europee e dell'ESA:
1. **Scienze Spaziali ed Esplorazione**, che include la scienza e l'esplorazione robotica dell'universo nonché l'esplorazione umana;
2. **Sicurezza e Protezione**, include sicurezza spaziale, applicazioni per la sicurezza e la protezione e sicurezza/protezione informatica;
3. applicazioni, include **Osservazione della Terra, Telecomunicazioni e Navigazione**;
4. attività abilitanti e a supporto, include **Tecnologie e Ingegneria, Trasporto Spaziale e Operazioni**.

Oggi le attività ESA finanziate direttamente dagli Stati membri ammontano a circa **4 Mld€** l'anno; inoltre l'ESA gestisce attività per conto di altri partner istituzionali (UE, Eumetsat, …) per circa 1,5 Mld€ l'anno.

Gli **indirizzi del Governo** in materia spaziale ed aerospaziale sono stati formalizzati il 25 marzo 2019 e individuano, in ordine di priorità, i settori strategici nazionali per lo **Spazio** e l'**Aerospazio** sui quali focalizzare gli investimenti per l'importanza delle potenziali ricadute e applicazioni:

- **le Telecomunicazioni, l'Osservazione della Terra e la Navigazione**, con particolare riferimento ai servizi ed applicazioni satellitari per i cittadini, le politiche nazionali relative alla sicurezza, la difesa, la salvaguardia dell'ambiente, del patrimonio culturale e paesaggistico nazionale, monitoraggio continuo del sistema agricolo, forestale e della pesca e delle infrastrutture e delle strutture critiche, nonché del Servizio nazionale di protezione civile;
- **lo studio dell'Universo**, anche attraverso la partecipazione a programmi di cooperazione internazionale, *in primis* con l'ESA e la NASA;
- **l'Accesso allo Spazio**, capacità indispensabile per una credibile politica spaziale, *in primis* incrementando la competitività di Vega, inclusi i servizi di lancio per mini, micro e nano satelliti, e le piattaforme di accesso allo spazio e rientro sulla Terra;
- **il Volo Sub-Orbitale e le Piattaforme Stratosferiche**; per acquisire una capacità tecnologica ed Industriale nazionale, anche impiegando le capacità offerte da potenziali Spazioporti nazionali;
- **In-Orbit Servicing**, incluse le capacità relative al *de-orbiting* di satelliti la possibilità di intervenire con operazioni di manutenzione ordinaria e straordinaria su satelliti; ciò comporta lo studio e sviluppo di sistemi di propulsione *low-thrust*, di identificazione, *tracking*, *docking* e di robotica intelligente;
- **l'Esplorazione Robotica** della Luna, di asteroidi, di pianeti e dei loro satelliti che necessariamente deve precedere eventuali programmi di esplorazione e colonizzazione umana del sistema solare;
- **l'Esplorazione Umana dello Spazio** mantenendo il ruolo di eccellenza acquisito dall'Italia nell'ambito della ricerca scientifica e delle capacità Industriali, consolidare la partecipazione ai programmi relativi alla Stazione Spaziale Internazionale, garantire un ruolo rilevante nel presidio dell'orbita lunare, anche attraverso ESA, le collaborazioni bilaterali (*in primis* con la NASA) e eventuali iniziative commerciali, valutare le opportunità offerte dalla futura presenza umana sulla superficie della Luna, rafforzare la cooperazione astronautica anche attraverso ulteriori opportunità con nuovi *partner*.

L'ASI, sulla base di questi indirizzi, sta predisponendo:

- un **Documento strategico di politica spaziale nazionale 2020-2030**;
- un **Documento di visione strategica per lo Spazio**;

che saranno sottoposti al COMINT per approvazione e poi formalizzerà le attività di breve-medio termine nel Piano Triennale delle Attività (l'ultimo approvato dal MIUR 2017-2019) dell'ASI che definisce gli obiettivi, i programmi di ricerca, i risultati socio-economici attesi, nonché le risorse correlate in coerenza con il Programma Nazionale della Ricerca, con gli indirizzi del Parlamento e del Governo in materia spaziale, con il DSPSN e il DVSS e, infine, nel quadro dei programmi ESA e della CE. Inoltre l'ASI, nell'ambito del mandato istituzionale, fornisce il suo contributo tecnico-operativo per lo sviluppo di programmi e attività della *Space Economy*[5] che trovano attuazione anche nell'ambito di investimenti esterni al bilancio dell'ASI. In tal modo si può realizzare una migliore e più armoniosa crescita del settore. L'Italia, nel 2016, ha definito un "**Piano Strategico *Space Economy***"[6], che prevede un investimento paese di circa 4,7 Mld€, di cui circa il 50% coperto con risorse pubbliche, tra nazionali e regionali, aggiuntive rispetto a quelle ordinariamente destinate alle politiche spaziali.

Il Piano è parzialmente confluito, come "Piano a Stralcio *Space Economy*", nel Piano Imprese e Competitività Fondo Sviluppo e Coesione 2014-2020, proposto dal MISE ed approvato dal CIPE nel dicembre 2016, che ha assegnato una prima dotazione di risorse pari a 360 M€, con l'obiettivo che esse possano generare un effetto leva pari a 2, per cui il valore complessivo dei programmi da avviare con il piano Stralcio ammonta a circa 1.050 M€. Il Piano si articola in **5 linee programmatiche**, in linea con le iniziative condotte a livello europeo e con l'obiettivo di valorizzarne al massimo l'impatto a livello nazionale:

- **Telecomunicazioni satellitari** (*Mirror GovSatCom*);
- **Supporto alla partecipazione nazionale a GALILEO** (*Mirror* Galileo);
- **Infrastruttura Galileo PRS**;
- **Supporto a Copernicus** (*Mirror* Copernicus);
- **Esplorazione spaziale e sviluppi tecnologici connessi.**

Allo stato attuale il programma GOVSATCOM è già stato bandito da ASI e, nell'aprile 2019, sono stati approvati i Piani Operativi di Dettaglio di *Mirror* Copernicus e di *Commercial in Orbit Servicing*.

5 La Space Economy è la catena del valore che, partendo dalla ricerca, sviluppo e realizzazione delle infrastrutture spaziali abilitanti arriva fino alla generazione di prodotti e servizi innovativi "abilitati" (servizi di telecomunicazioni, di navigazione e posizionamento, di monitoraggio ambientale previsione meteo, ecc...). Essa rappresenta una delle più promettenti traiettorie di sviluppo dell'economia mondiale dei prossimi decenni.

6 https://www.mise.gov.it/images/stories/documenti/all_6_Piano_Strategico_Space_Economy_master_13052016_regioni_final.pdf

TECNOLOGIE PRIORITARIE

Le Tecnologie Prioritarie per il Settore Spazio, individuate dal Gruppo di Lavoro, fanno riferimento a 10 grandi Aree quali: Scienza ed Esplorazione, Protezione *Assets* Spaziali, Sistemi a bordo di Satelliti, Osservazione della Terra, Guida e Navigazione Satellitare, Propulsione e Propellenti, Trasporto Spaziale, Materiali e Processi, Telecomunicazioni, Fotonica. In particolare esse sono:

Scienza ed Esplorazione

- Tecnologie per Missioni Gravimetriche;
- Tecnologie per l'Esplorazione Solare;
- Strutture Avanzate Ultraleggere e Adattive;
- Robotica e Intelligenza Artificiale: un binomio strategico nell'ambito dell'Esplorazione Spaziale;
- Tecnologie per il Rientro Atmosferico e l'Esplorazione;
- Controllo Ambientale Evoluto;
- Stoccaggio e Distribuzione di Energia.

Protezione Assets Spaziali

- Sistemi avanzati per Integrazione, Rifornimento, Trasporto e Rimozione Satelliti/Detriti in orbita;
- Tecnologie e Applicazioni per la Sicurezza nello Spazio;
- Tecnologie di *Cybersecurity* per la protezione dei Sistemi Spaziali.

Sistemi a bordo di Satelliti

- Tecnologie per Antenne a bordo di Satelliti;
- Tecnologie di miniaturizzazione equipaggiamenti per Microsatelliti, Payload Compatti (Sensori e Camere per l'Osservazione della Terra) e relative applicazioni di emergenza.

Osservazione della Terra

- Tecnologie per RADAR da Osservazione della Terra;
- Sistemi per la Gestione e Trasmissione Dati ad altissima velocità nelle bande KA e X per le Future Missioni di Osservazione della Terra;
- Tecnologie avanzate basate su Intelligenza Artificiale per il trattamento di Immagini Radar.

Guida e Navigazione Satellitare

- Orologi Atomici Spaziali "next generation";
- Tecnologie di Guida e Navigazione Autonomi tramite elaborazioni di Immagini.

Propulsione e Propellenti

- Tecnologie per la Propulsione Spaziale: Elettrica, Avanzata, RAMJet/ SCRAMJet (volo ipersonico e 2 stage 2 orbit);
- Sviluppo Nuovi Propellenti Solidi.

Trasporto Spaziale

- Tecnologie per l'Accesso allo Spazio;
- Serbatoi e Strutture di Nuova Generazione per Lanciatori e Veicoli Spaziali.

Materiali e Processi

- Additive Manufacturing.

Telecomunicazioni

- Tecnologie Flessibili di Telecomunicazione per colmare il divario digitale e per Applicazioni Governative.

Fotonica

- Ottica e Fotonica per lo Spazio: La nuova frontiera per innovare alla velocità della luce.

SPACE FOR LIFE

CREDIAMO NELLO SPAZIO COME
NUOVO ORIZZONTE DELL'UMANITÀ
PER COSTRUIRE UNA VITA SULLA TERRA
MIGLIORE E SOSTENIBILE.



ThalesAlenia Space
a Thales / Leonardo company

TECNOLOGIE

>PARTE 2<

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 1

TECNOLOGIE PER MISSIONI GRAVIMETRICHE

DESCRIZIONE

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.

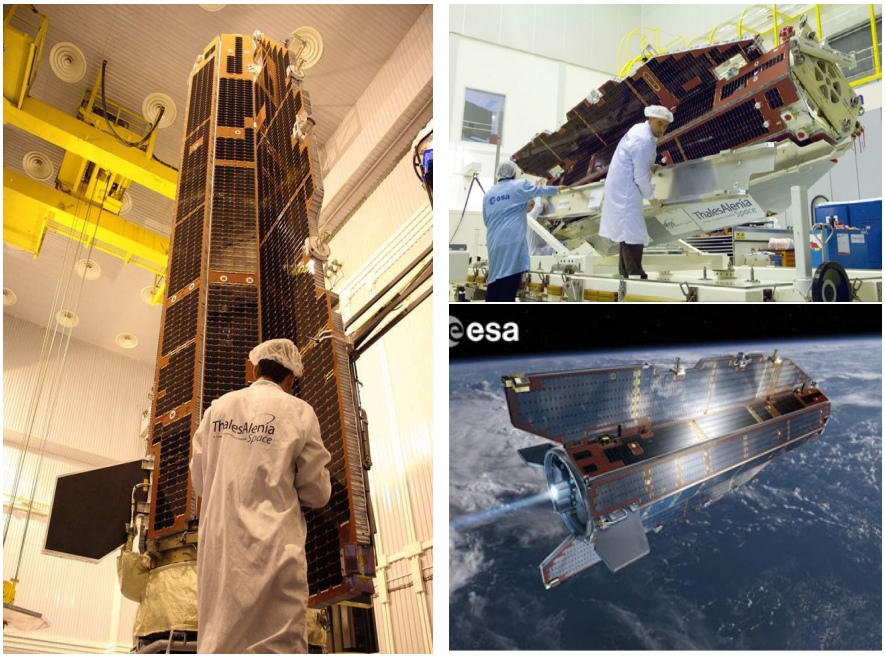


FIG. 1.1 GOCE REALIZZATO DA THALES ALENIA SPACE IN ITALIA, È STATO IL PRIMO SATELLITE A PORTARE IN ORBITA UN GRADIOMETRO PER LA MISURA DEL CAMPO GRAVITAZIONALE TERRESTRE E AD ESSERE DOTATO DI UN SISTEMA DI COMPENSAZIONE DELLA FORZA AERODINAMICA PRODOTTA DALL'ATMOSFERA RESIDUA MEDIANTE UN PROPULSORE ELETTRICO A IONI A SPINTA VARIABILE. (CREDIT ESA)

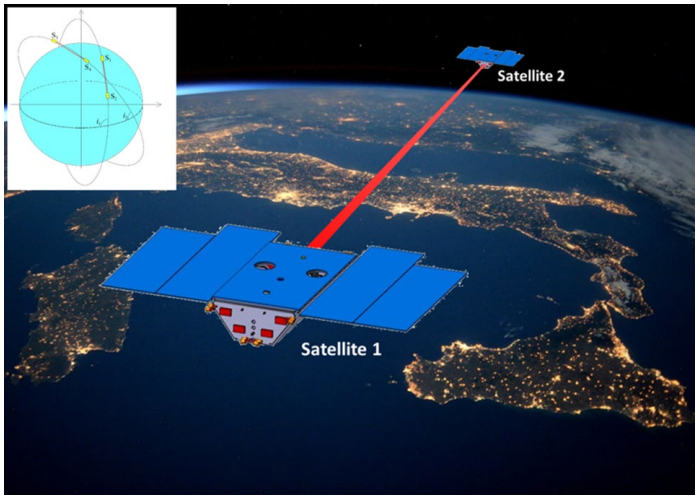


FIG. 1.2 LA MISSIONE GRAVIMETRICA DI NUOVA GENERAZIONE (NEXT GENERATION GRAVITY MISSION) PROGETTATA DA THALES ALENIA SPACE IN ITALIA CONSISTE DI DUE COPPIE DI SATELLITI, UNA IN ORBITA POLARE ED UNA IN ORBITA A MEDIA INCLINAZIONE, LA CUI DISTANZA (ff100 KM) CONTINUAMENTE MODIFICATA DAL CAMPO GRAVITAZIONALE TERRESTRE VIENE MISURATA DA UN INTERFEROMETRO LASER CON LA RISOLUZIONE DI POCHI NANOMETRI. (CREDIT THALES ALENIA SPACE)

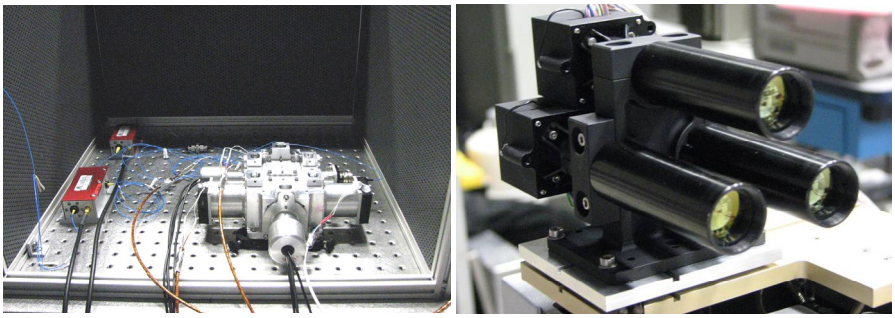


FIG. 1.3 PROTOTIPI DELL'INTERFEROMETRO LASER PER LA MISURA DELLA VARIAZIONE DELLE DISTANZA INTER-SATELLITARE (A SINISTRA) E DEL SISTEMA METROLOGICO PER L'ACQUISIZIONE E IL MANTENIMENTO DEL PUNTAMENTO DEL FASCIO LASER (A DESTRA), REALIZZATI DA THALES ALENIA SPACE IN COLLABORAZIONE CON INRIM. (CREDIT THALES ALENIA SPACE)

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 2

TECNOLOGIE PER L'ESPLORAZIONE SOLARE

DESCRIZIONE

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*.

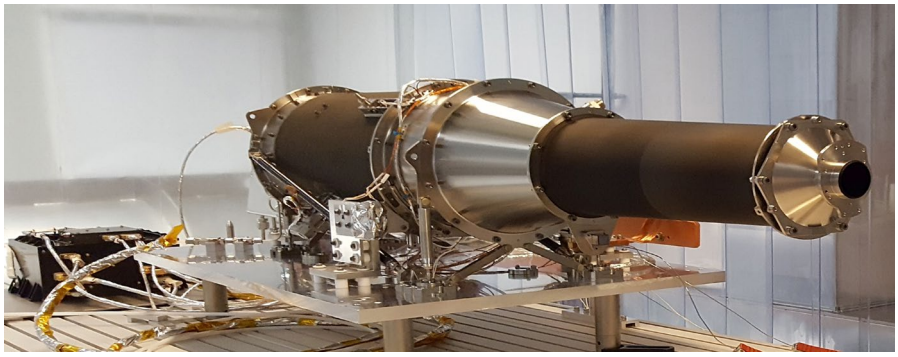
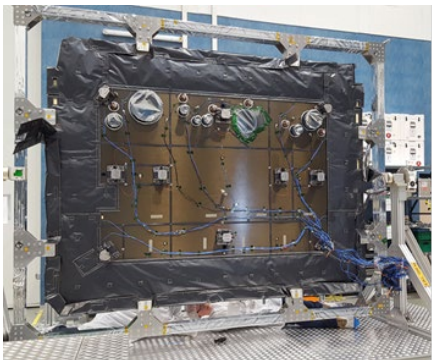


FIG. 2.1 MODELLO DI VOLO DEL CORONOGRAFO METIS, INTEGRATO DA THALES ALENIA SPACE IN ITALIA NELLA OPTICAL PAYLOAD SYSTEMS FACILITY. LA STRUTTURA DEL CORONOGRAFO È REALIZZATA IN MATERIALI COMPOSITI E TITANIO PER GARANTIRE LA DOVUTA STABILITÀ E RESISTENZA ALLE ALTE TEMPERATURE.
(CREDIT THALES ALENIA SPACE)



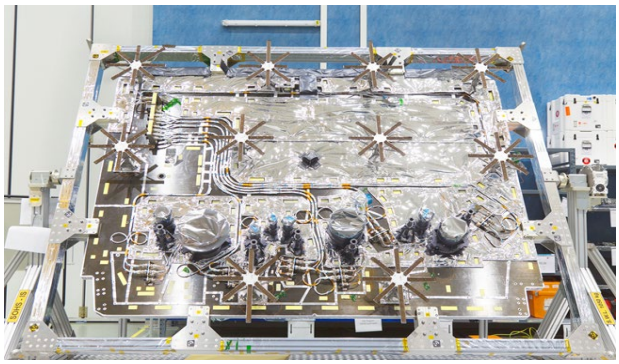


FIG. 2.2 LO SCUDO TERMICO REALIZZATO DA THALES ALENIA SPACE IN ITALIA PROTEGGERÀ SOLAR ORBITER ED I SUOI STRUMENTI, TRA CUI METIS, DAL FLUSSO DI RADIAZIONE TERMICA PROVENIENTE DAL SOLE CHE ALLA MINIMA DISTANZA DI 0.28 UNITÀ ASTRONOMICHE RAGGIUNGERÀ 17 KW/M2.
(CREDIT THALES ALENIA SPACE)

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 3

STRUTTURE AVANZATE ULTRALEGGERE E ADATTIVE

DESCRIZIONE

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)

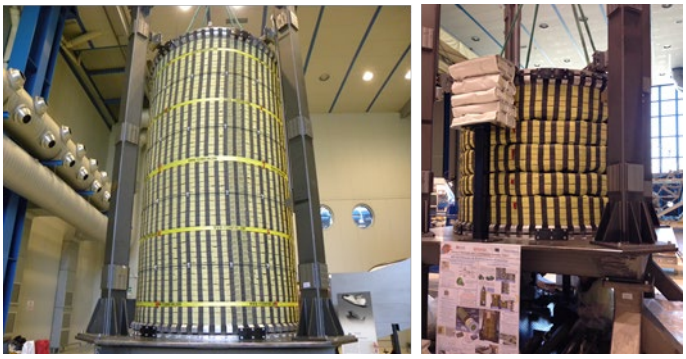


FIG. 3.2 DIMOSTRATORE DI AIRLOCK GONFIABILE/ESPANDIBILE (PROGRAMMA REGIONALE STEPS2). (CREDIT THALES ALENIA SPACE ITALIA)

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.

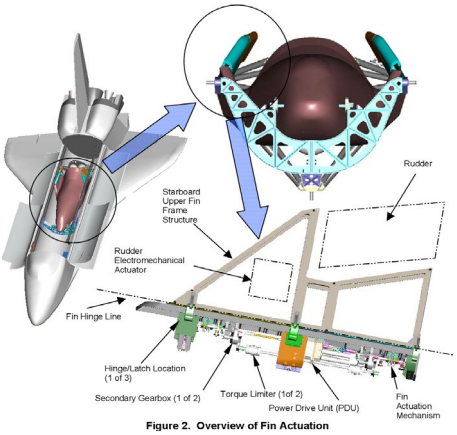
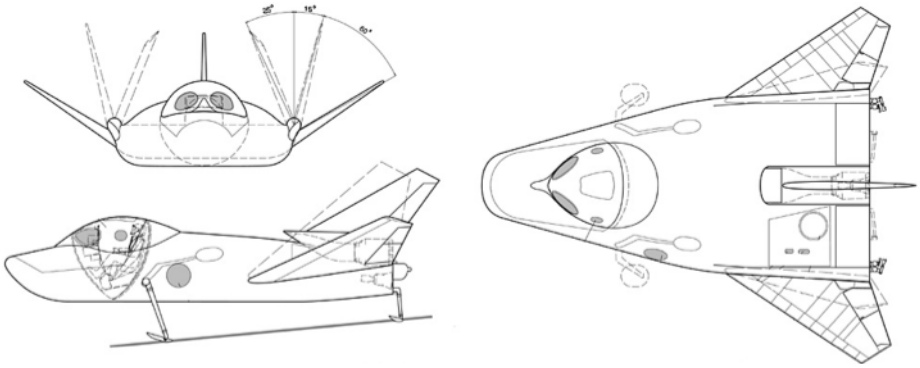


Figure 2. Overview of Fin Actuation

(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)

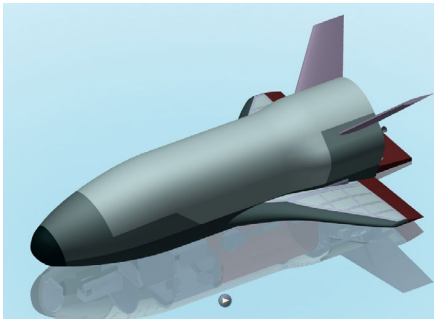


FIG. 3.4: USV3 DWS CONCEPT DESIGN (CREDIT CIRA)

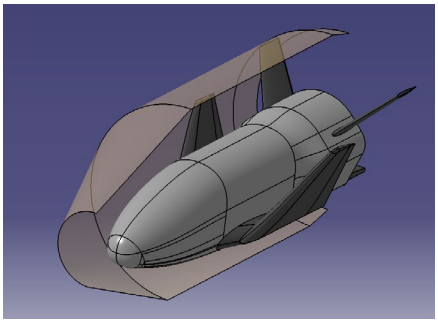


FIG. 3.5: USV3 DWS WITHIN VEGA FAIRING - WINGS DEPLOYED HOUSING - WING STOWED (CREDIT CIRA)

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

DESCRIZIONE

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.

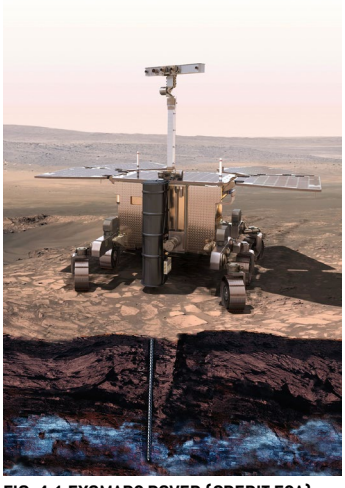


FIG. 4.1 EXOMARS ROVER (CREDIT ESA)

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.

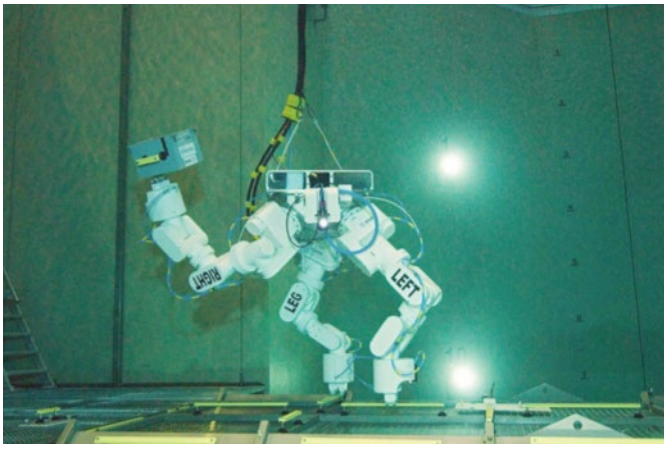


FIG. 4.2 EUROBOT WET MODEL (UNDERWATER OG PROTOTYPE) (CREDIT THALES ALENIA SPACE)

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

DESCRIZIONE

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.

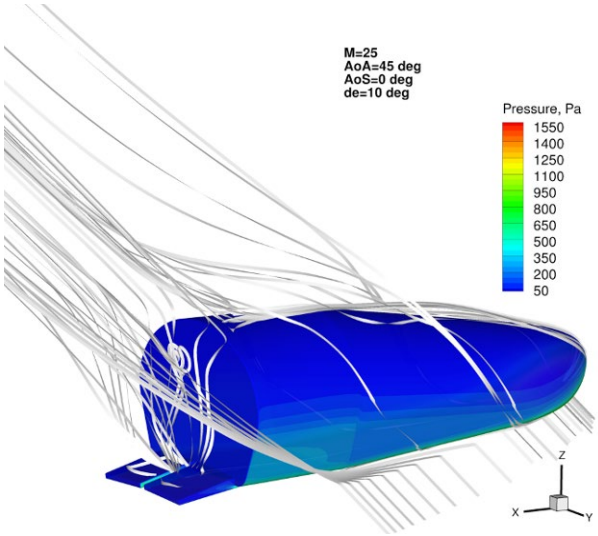


FIG. 5.1 IXV SIMULAZIONI CFD (CREDIT ESA)

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).

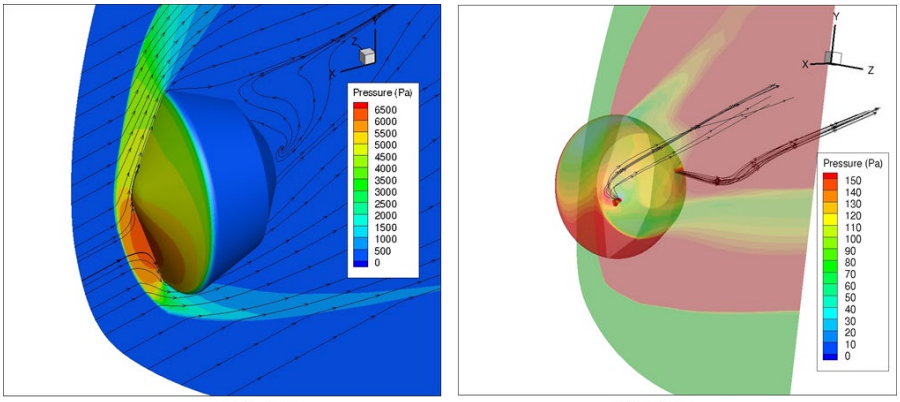


FIG. 5.2 SIMULAZIONE CFD DEGLI EFFETTI DEI PROPULSORI PER IL CONTROLLO DI ASSETTO SUL CAMPO AERODINAMICO DI UN CAPSULA (CREDIT THALES ALENIA SPACE/CIRA).

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)

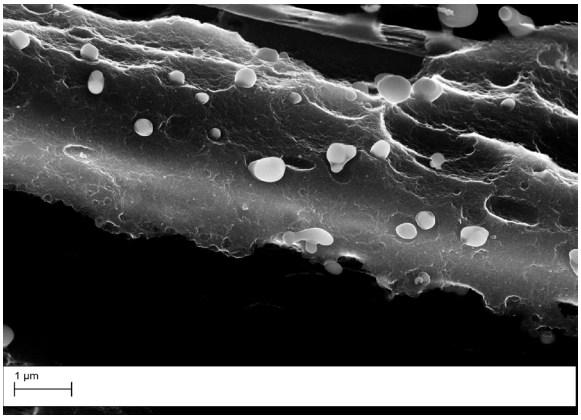


FIG. 5.4 NANOPARTICELLE DISPERSE NELLA MATRICE DI UN MATERIALE ABLATIVO (CREDIT DIP. INGEGNERIA CHIMICA, MATERIALI AMBIENTE, UNIVERSITÀ LA SAPIENZA DI ROMA).

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)

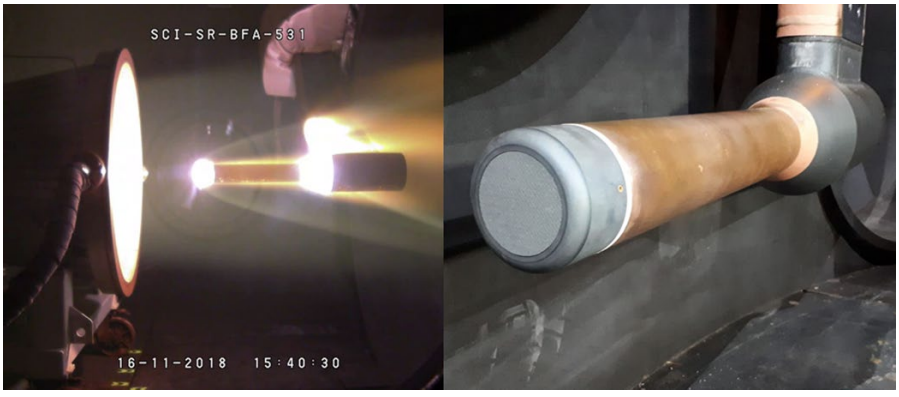


FIG. 5.6 CAMPIONE DI ISICOMP ESPOSTO AL FLUSSO IPERSONICO NELLA GALLERIA SCIROCCO (CREDIT CIRA)

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.

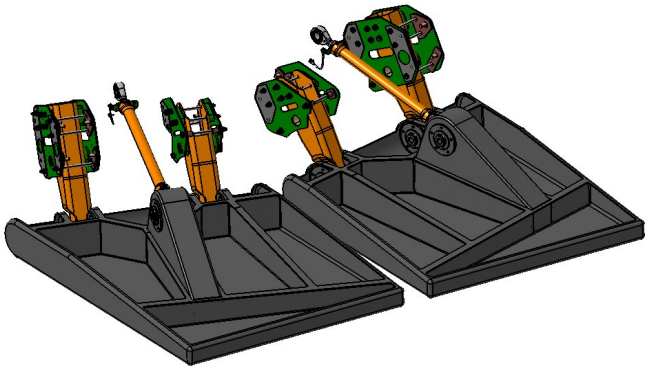
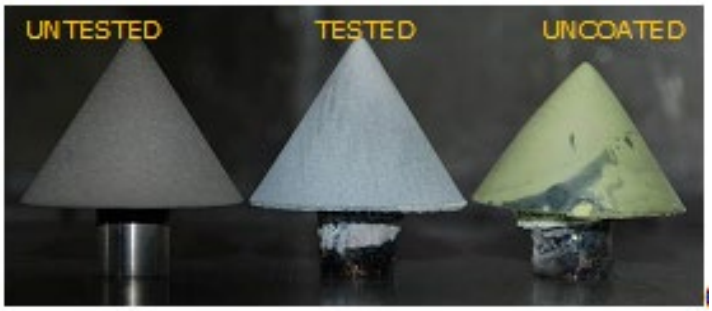
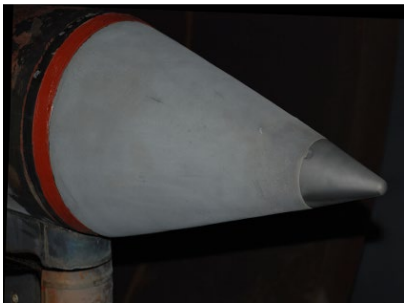


FIG. 5.7 SOTTOSISTEMA SUPERFICI DI CONTROLLO SPACE RIDER (CREDIT CIRA/THALES ALENIA SPACE IN ITALIA)

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)

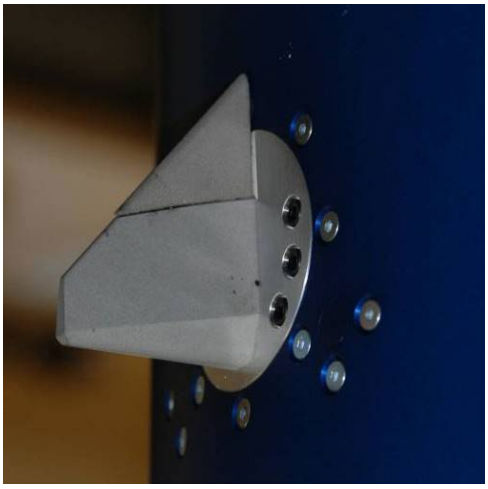


FIGURA 5.11 - SCRAMSPACE WINGLETS ASSEMBLATO AL CIRA E INTEGRATO SUL VEICOLO DI LANCIO (CREDIT CIRA)

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).

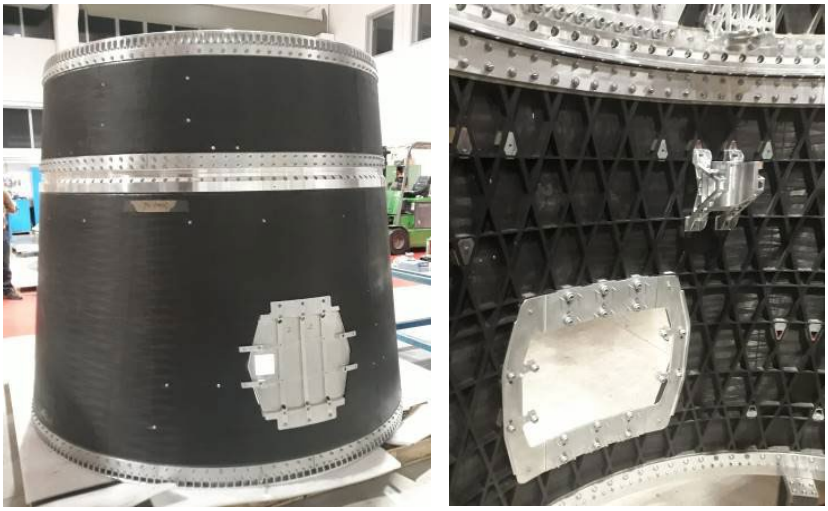


FIG. 5.14 MODELLO DI QUALIFICA DELL'INTERSTADIO 2/3 DEL LANCIATORE VEGA-C (GIUSTO ET AL., PROCEEDINGS OF 12TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPOSITE SCIENCE AND TECHNOLOGY, 8-10 MAGGIO 2019.) (CREDIT CIRA /AVIO)



FIG. 5.15 DIMOSTRATORE TECNOLOGICO DI UN "CENTRAL TUBE" SATELLITARE (CREDIT CIRA/ESA)

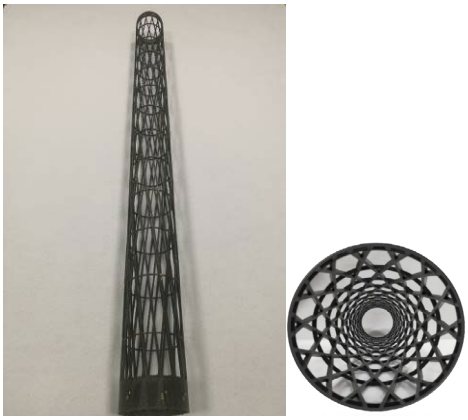


FIG. 5.16 – DIMOSTRATORE DI UN BOOM PER UN'ANTENNA DISPIEGABILE (CREDIT CIRA/ESA)

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.

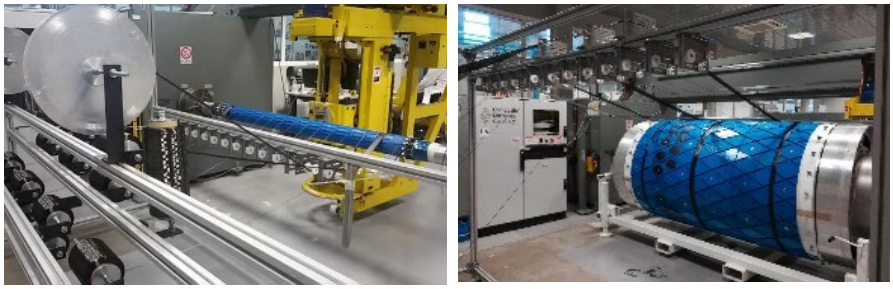


FIG. 5.17 TECNICA BREVETTATA DA CIRA PER INTERLACCIARE GLI IRRIGIDIMENTI ELICOIDALI E CIRCONFERENZIALI. (CREDIT CIRA)

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.

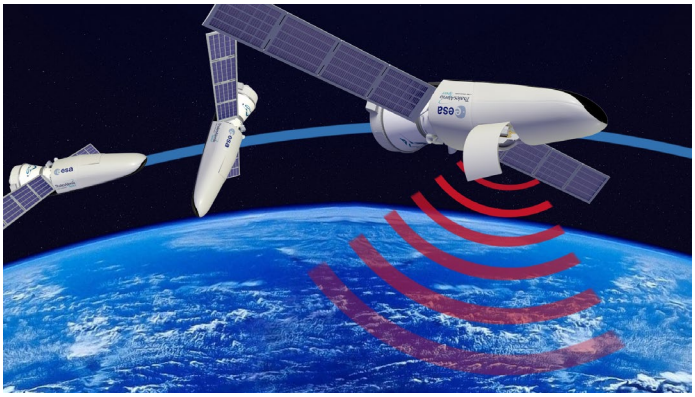
Il modulo di rientro dissiperà gradualmente la sua alta energia cinetica volando per circa 8.000km sulla sua traiettoria di rientro controllata nell'atmosfera.

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)

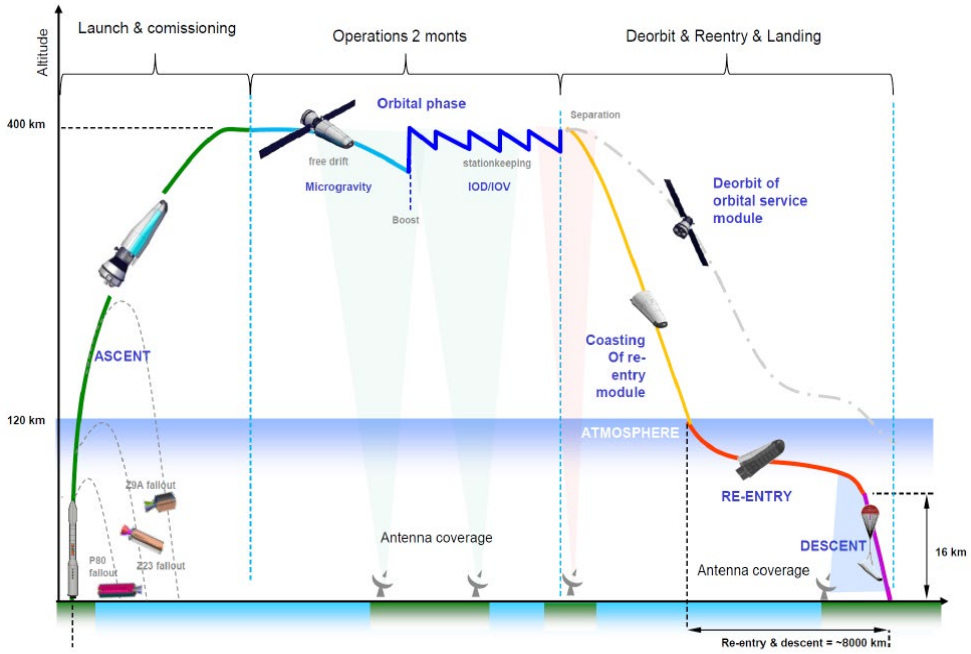


FIG. 5.19 SPACE RIDER, PROFILO DI MISSIONE (CREDIT THALES ALENIA SPACE IN ITALIA)

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

DESCRIZIONE

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.

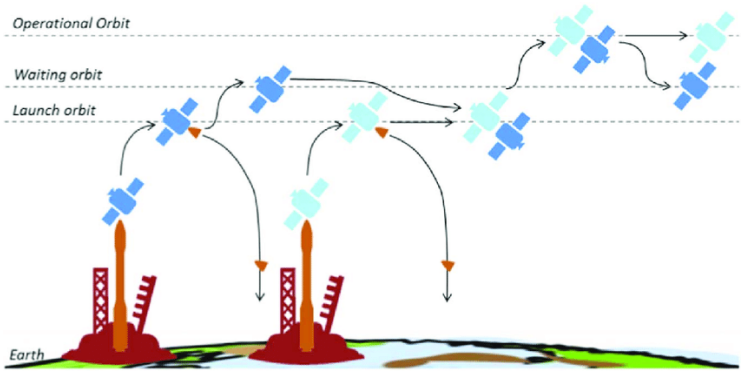


FIG. 6.1 ESEMPIO DI TRASFERIMENTO ORBITALE USANDO UNO SPACE TUG (FONTE: SAPERE STRONG, POLITECNICO DI TORINO E THALES ALENIA SPACE).

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.

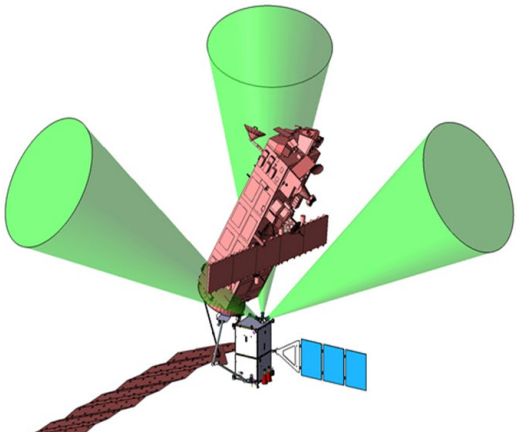


FIG. 6.2 ESEMPIO DI CATTURA A SCOPI DI PULIZIA DELLO SPAZIO (FONTE: STUDIO ESA E.DEORBIT PER LA RIMOZIONE DEL SATELLITE ENVISAT)

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

DESCRIZIONE

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.

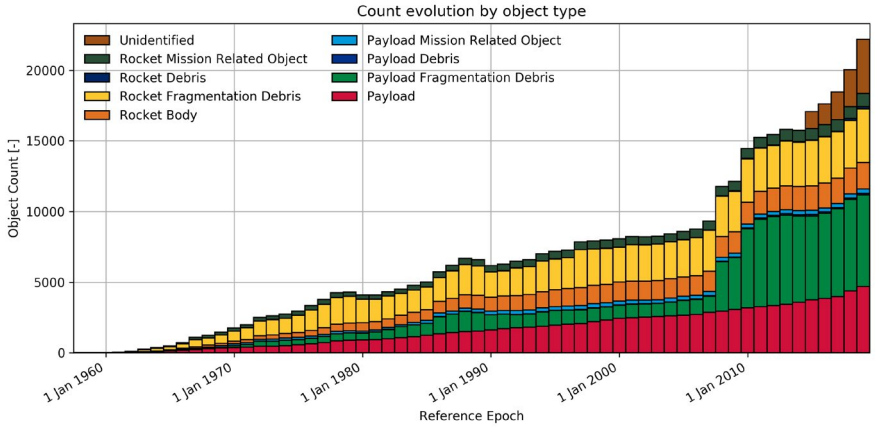


FIG. 7.2 CRESCITA NEL TEMPO DELLA POPOLAZIONE DEI DETRITI SPAZIALI. I COLORI INDICANO L'ORIGINE DIVERSA DEI DETRITI COME INDICATO IN LEGENDA (CREDIT ESA).

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

DESCRIZIONE

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

DESCRIZIONE

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.

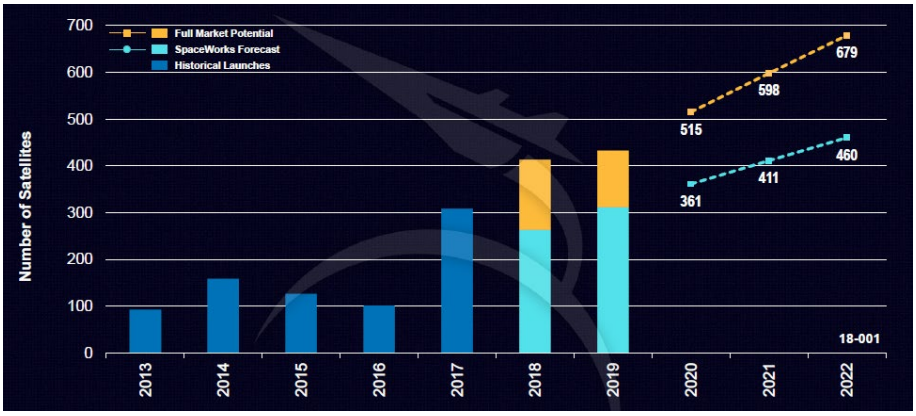


FIG. 9.1 PROIEZIONE AL 2022 DI LANCIO DI NANO E MICRO-SATELLITI (CREDIT SPACEWORKS)

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.

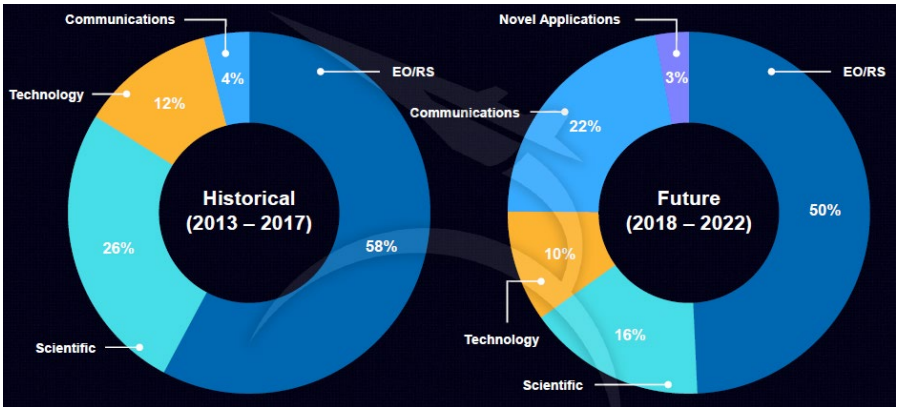


FIG. 9.2 FUTURI TRENDS DI APPLICAZIONE DI NANO E MICRO-SATELLITI (CREDIT SPACEWORKS)

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

DESCRIZIONE

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

DESCRIZIONE

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*.

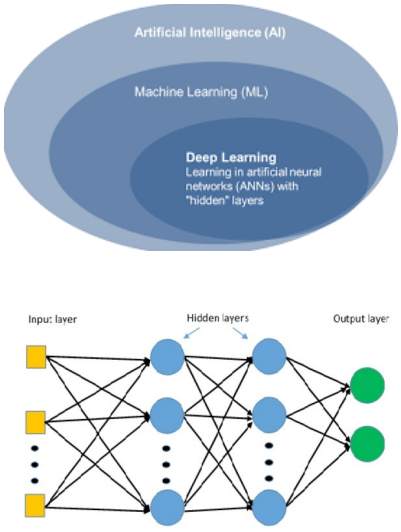


FIG. 12.1 RELAZIONE TRA LE TIPOLOGIE DI ALGORITMI AI ED ESEMPIO DI MLP (CREDIT THALES ALENIA SPACE)

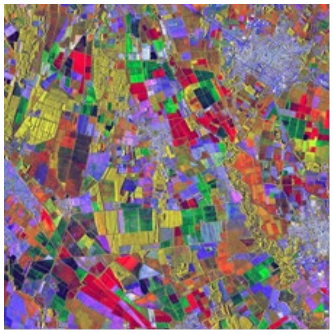


FIG. 12.2 CLASSIFICAZIONE DI UNA IMMAGINE RADAR (CAMPO AGRICOLO) TRAMITE AI (CREDIT THALES ALENIA SPACE)

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.

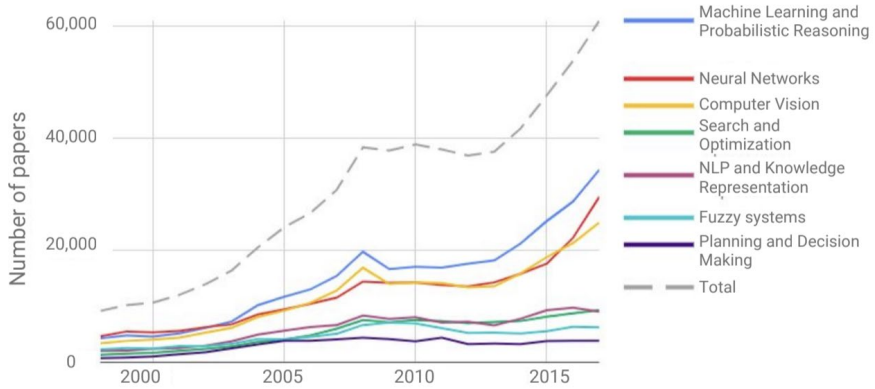


FIG. 12.3 NUMERO DI ARTICOLI SULL'AI NEGLI ULTIMI ANNI (CREDIT KRISTEN CARLSON)

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

DESCRIZIONE

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.

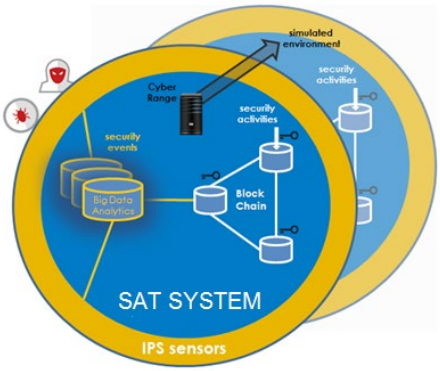


FIG. 13.1 SCHEMA DI PRINCIPIO DEI SERVIZI DI CYBERSECURITY (CREDIT THALES ALENIA SPACE)

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"

DESCRIZIONE

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

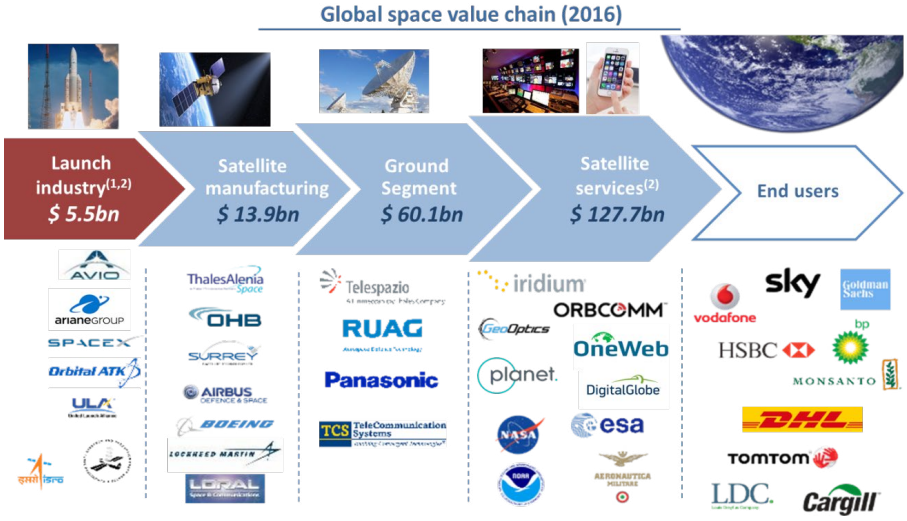
È necessario un investimento dell'ordine dei 10Meuro per completare lo sviluppo dell'orologio atomico italiano spaziale RbPOP.

TECNOLOGIA PRIORITARIA N. 15

TECNOLOGIE PER LA PROPULSIONE SPAZIALE: ELETTRICA, AVANZATA, RAMJET/SCRAMJET (VOLO IPERSONICO E 2 STAGE 2 ORBIT)

DESCRIZIONE

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

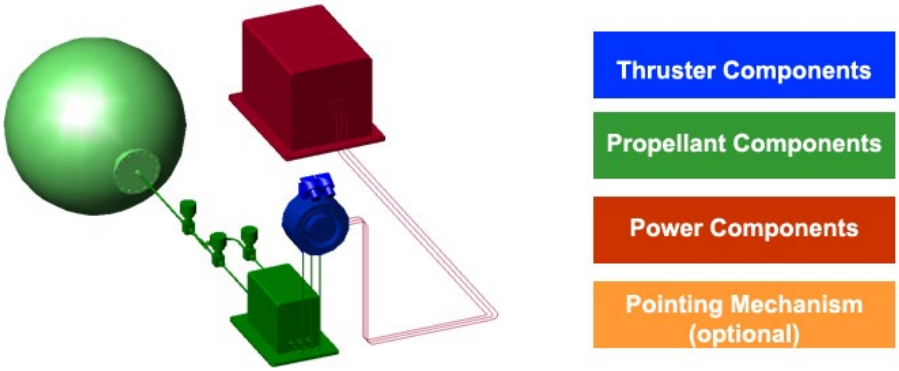


FIG. 15.1.1 SISTEMA DI PROPULSIONE ELETTRICA: BLOCCHI FUNZIONALI PRINCIPALI (CREDIT ESA).

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).

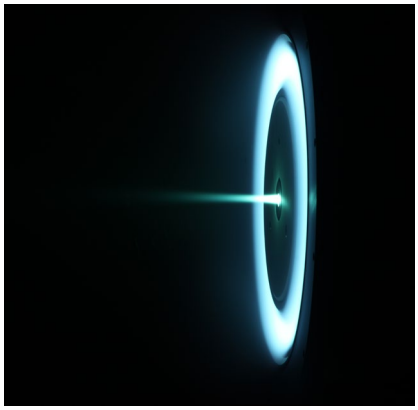


FIG.15.1.2 IL PROPULSORE HT20K DI SITAEL (20 KW DI POTENZA, 1 N DI SPINTA) IN CONFIGURAZIONE "MAGNETIC SHIELDING", OPERATO CON XENON NELLA FACILITY IV10. (CREDIT SITAEL S.P.A)

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).

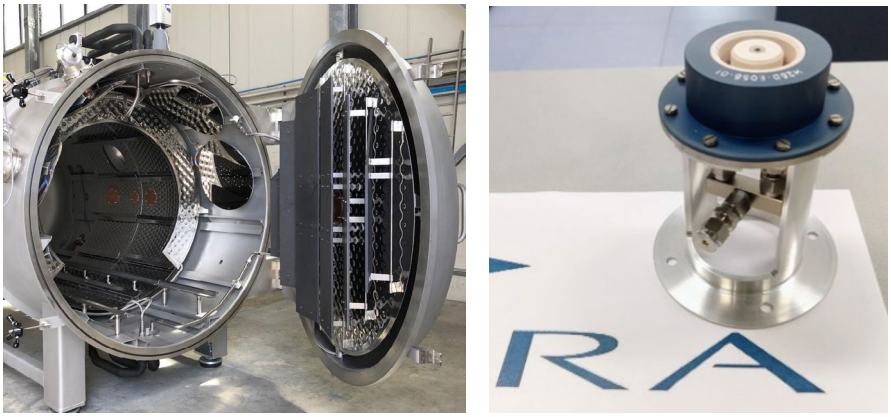


FIG 15.1.3 FACILITY MSVC (A SINISTRA); MOTORE CR-HET 250 (A DESTRA). (CREDIT CIRA)

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.

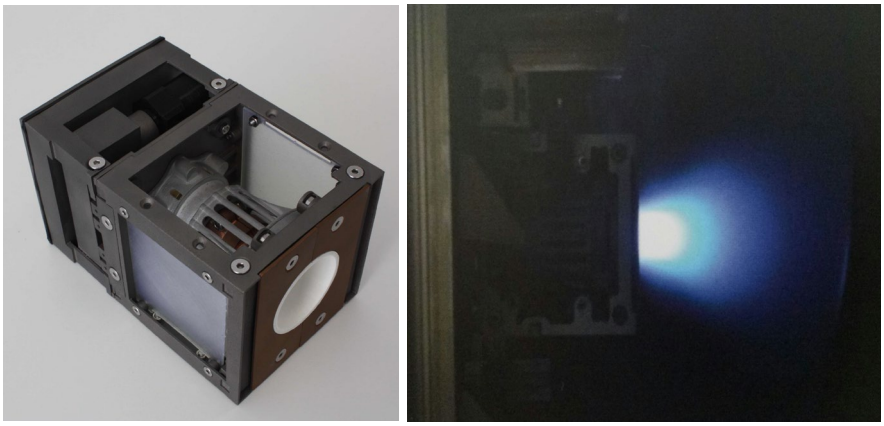


FIG.15.1.4 A SINISTRA, IL SISTEMA REGULUS COMPLETO, DA 1.5 U, PRONTO PER L'INTEGRAZIONE SUL CUBESAT. A DESTRA, L'HPT OPERATO IN VUOTO NELLE FACILITIES DI T4I. (CREDIT T4I SRL).

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.

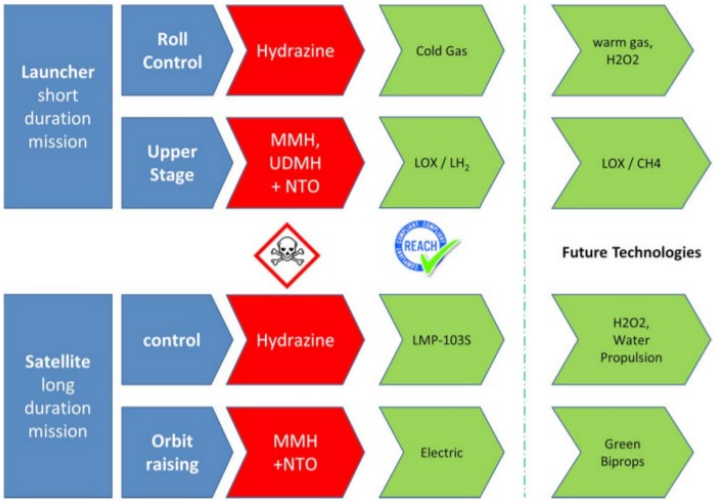


FIG.15.2.1 AREE TECNOLOGICHE DI SVILUPPO PROPULSIONE GREEN (GOTZIG, CHALLENGES AND ECONOMIC BENEFITS OF GREEN PROPELLANTS FOR SATELLITE PROPULSION, EUCASS 2017).

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.

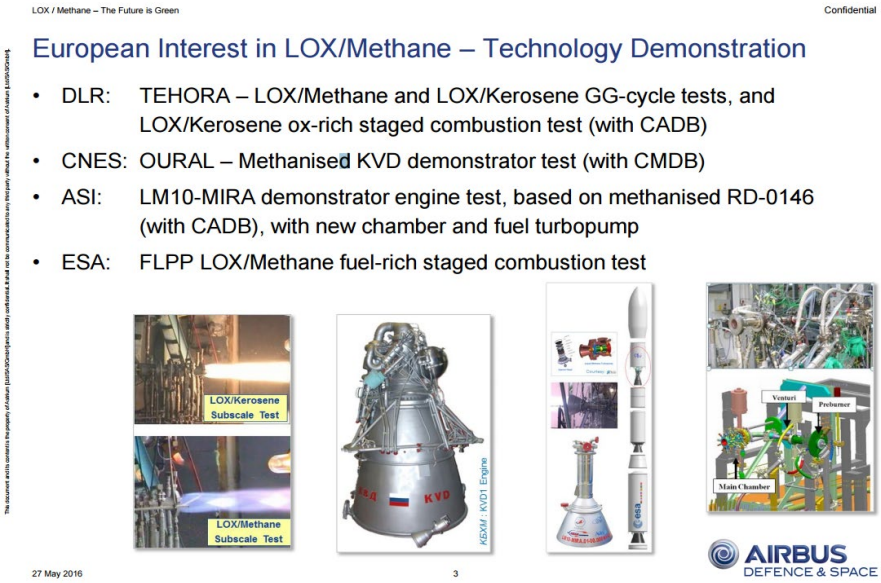


FIG.15.2.2 MOTORI A METANO IN SVILUPPO IN EUROPA (SPACE PROPULSION PROCEEDINGS, 2016).

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*.

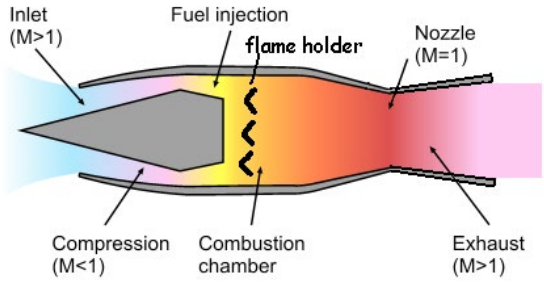
È fondamentale, inoltre, dotare il paese di un **infrastruttura di test di ricerca** su cui investigare su componenti di piccola taglia le fenomenologie relative all'iniezione, alla combustione e allo scambio termico.

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.

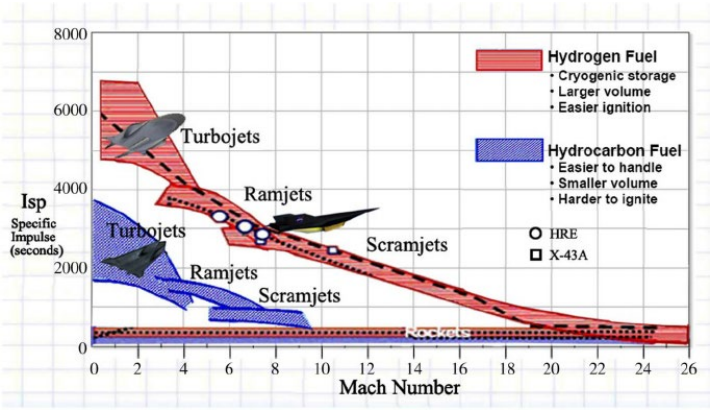


FIG. 15.3.2 IMPULSO SPECIFICO IN FUNZIONE DEL NUMERO DI MACH PER VARI TIPI DI PROPULSORI AEROSPAZIALI (FONTE: WWW.QUORA.COM)

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*").

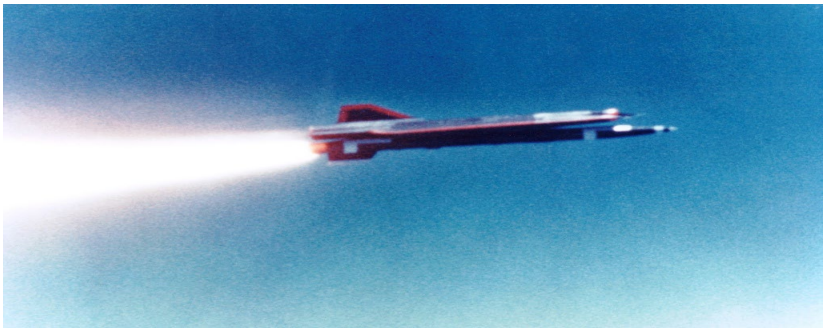


FIG. 15.3.3. RECONNAISSANCE DRONE LOCKHEED D-21B AVIO-LANCIATO DA UN B-52 E ACCELERATO DA UN SRM ALLE CONDIZIONI OPERATIVE DEL PROPULSORE RAMJET (DA HTTPS://EN.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/LOCKHEED_D-21#/MEDIA/)

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

DESCRIZIONE

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

DESCRIZIONE

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.

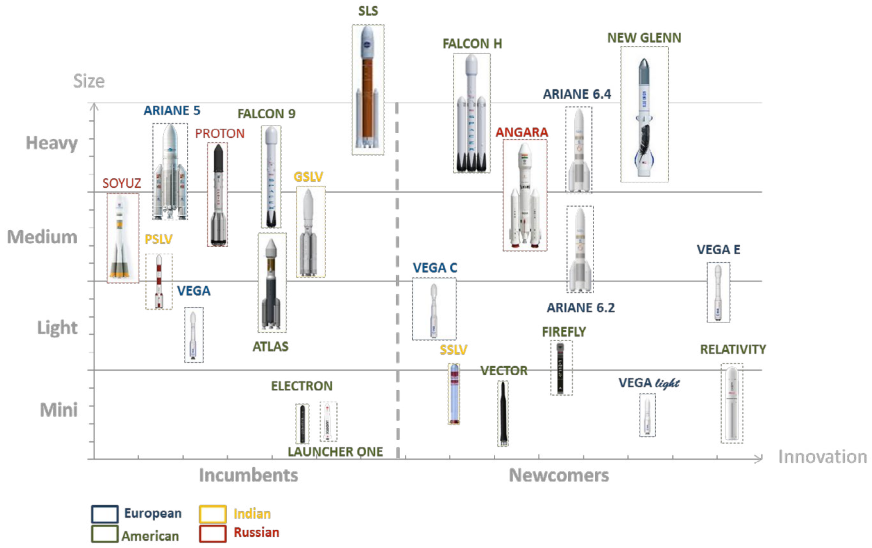


FIG. 17.1 ACCESSO ALLO SPAZIO: GLI ATTORI PRINCIPALI (CREDIT AVIO)

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.

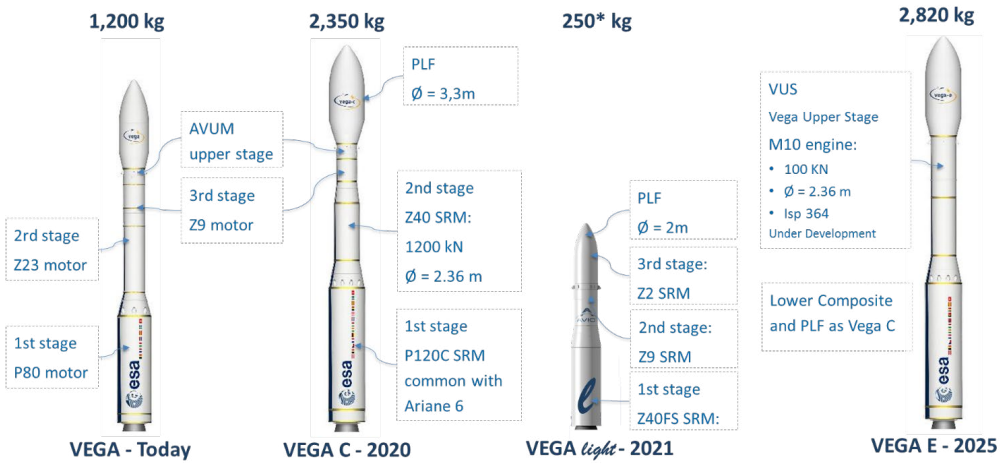


FIG. 17.2 L'EVOLUZIONE DEI PICCOLI LANCIATORI EUROPEI (CREDIT AVIO)

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).

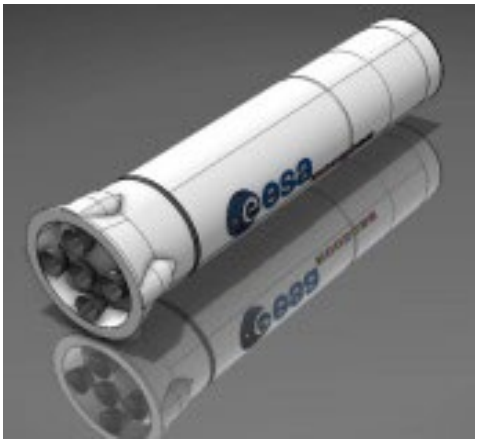


FIG. 17.1.1 PRIMO STADIO RIUTILIZZABILE (CREDIT AVIO)

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;

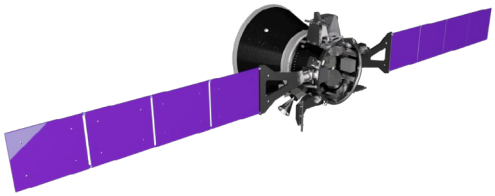


FIG. 17.3.2 MODULO ESTENSIONE DELLA VITA ORBITALE (CREDIT AVIO)

- moduli propulsivi addizionali per missioni che richiedano lunghe manovre di trasferimento orbitale, a base di propulsione elettrica o chimica.

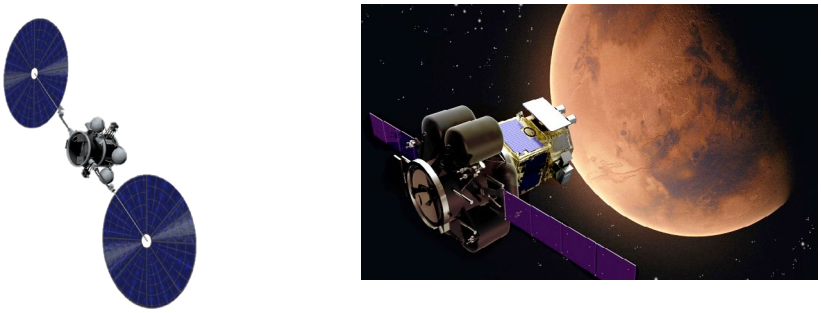


FIG. 17.3.3 MODULI PROPULSIVI AUSILIARI (CREDIT AVIO)

- 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

DESCRIZIONE

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 STABILITÀ 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

DESCRIZIONE

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.

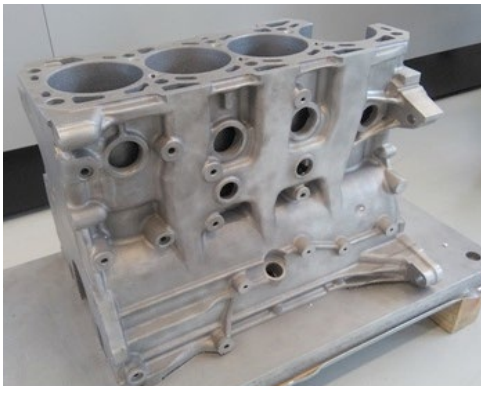


FIG. 19.1 ESEMPIO DI STAMPA METALLICA DI UN ASSIEME COMPLESSO (CREDIT ZARE S.R.L)

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.

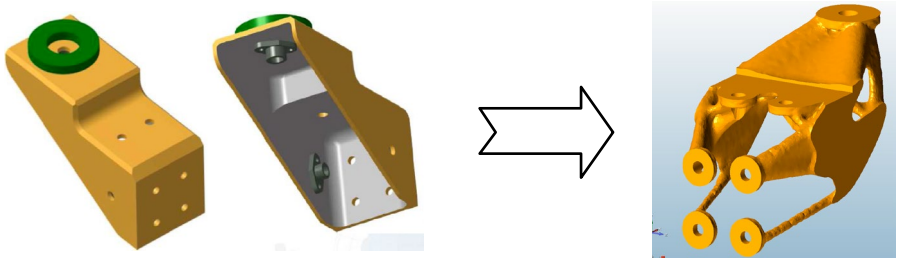


FIG. 19.3 ESEMPIO DI FORMA BIO-INSPIRED, A DESTRA, RISPETTO AD UNA FORMA TRADIZIONALE (CREDIT THALES ALENIA SPACE IN ITALIA)

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.

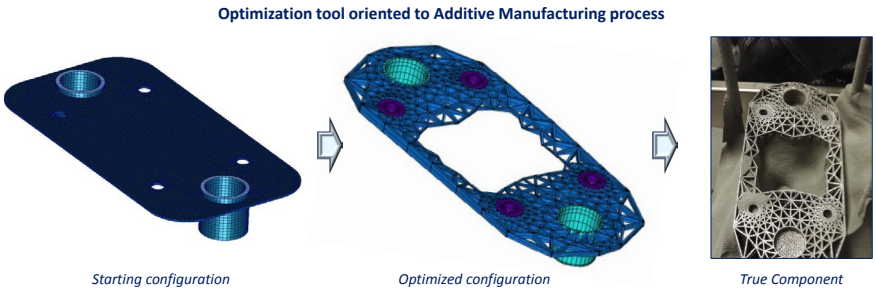


FIG. 19.4 PROCESSO DI OTTIMIZZAZIONE TOPOLOGICA CON STRUTTURA "LATTICE" (CREDIT CIRA)

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.

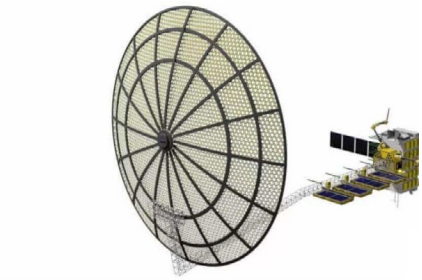


FIG. 19.6 "PICTORIAL VIEW" DI UNA SOLUZIONE CON RIFLETTORE DI GRANDI DIMENSIONI (CREDIT THALES ALENIA SPACE IN ITALIA)

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 *Bioficial 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.

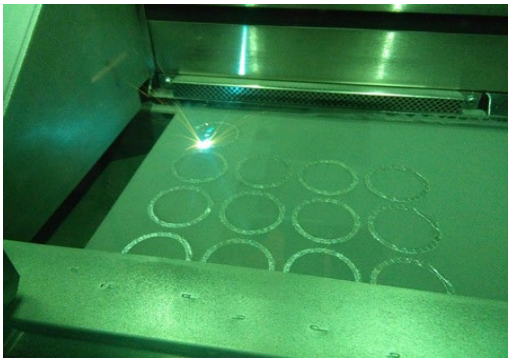


FIG. 19.7 IMMAGINE DI FUSIONE LASER PROCESSO SLM (CREDIT ZARE SRL)

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.

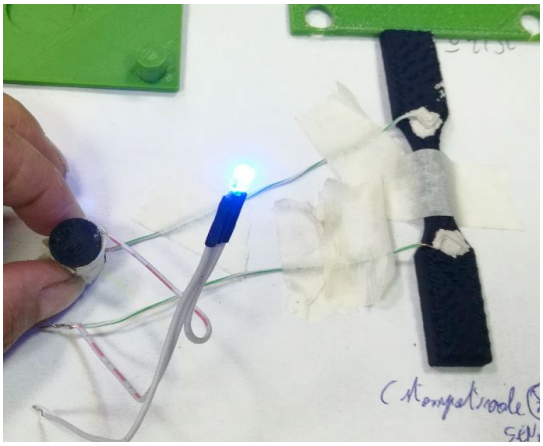


FIG. 19.8 PROVA DI LABORATORIO DI POLIMERO RESO ELETTRICAMENTE CONDUTTIVO (CREDIT GRUPPO SCIENZA E TECNOL. DEI MATERIALI, DIP.TO ING. DELL'IMPRESA UNIV. ROMA TOR VERGATA)

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**.

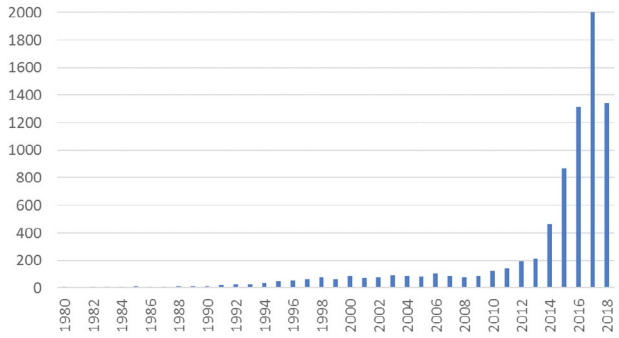


FIG. 19.9A NUMERO DI BREVETTI PER ANNO

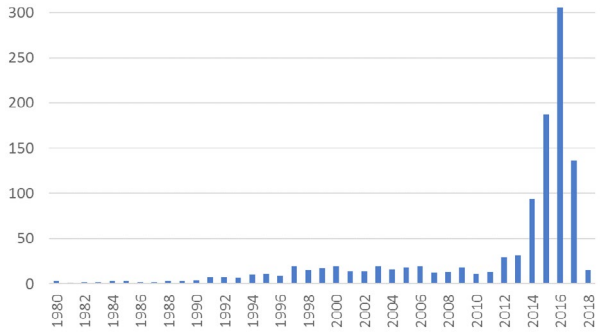


FIG. 19.9B. NUMERO DI BREVETTI A MAGGIORE IMPATTO (TOP 10%) PER ANNO

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.

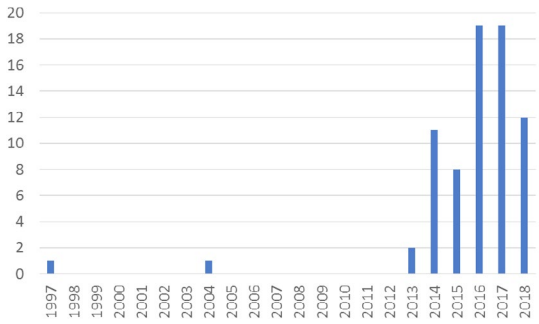


FIG. 19.10 NUMERO DI BREVETTI PER ANNO PER L'ITALIA

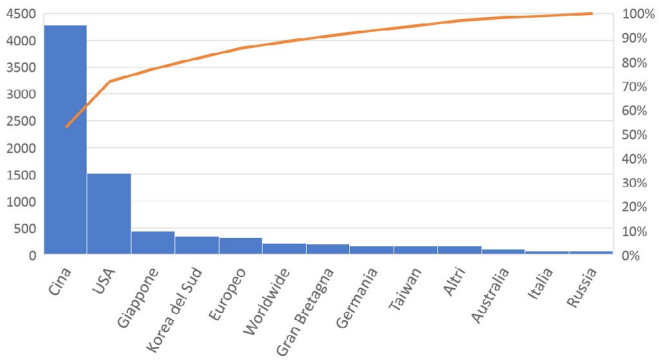


FIG. 19.11 NUMERO DI BREVETTI PER PAESE DI PRIMA APPLICAZIONE

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.

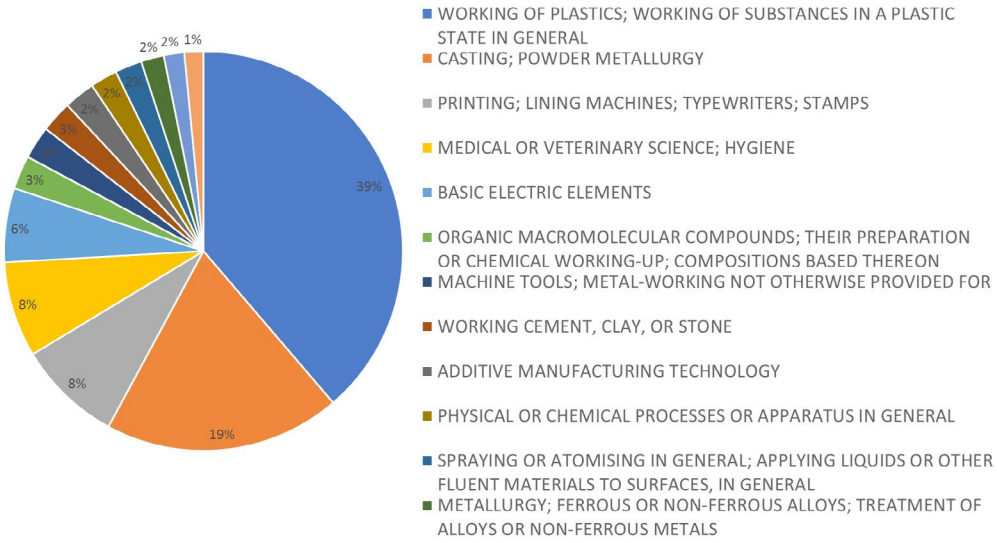


FIG. 19.12 DISTRIBUZIONE DEI BREVETTI (80%) PER CLASSIFICAZIONE INTERNAZIONALE (IPC)

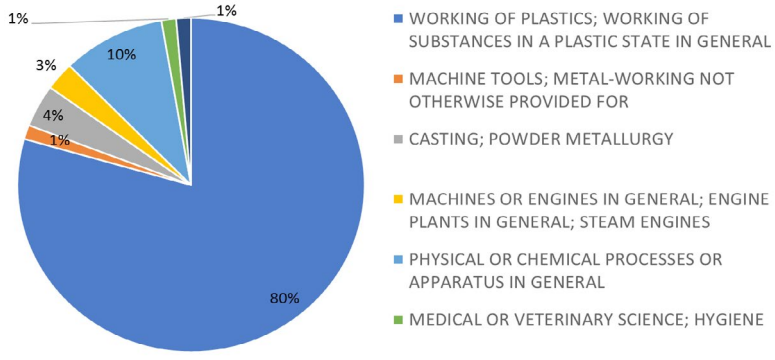


FIG. 19.13 DISTRIBUZIONE DEI BREVETTI ITALIANI PER CLASSIFICAZIONE INTERNAZIONALE (IPC)

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

DESCRIZIONE

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.

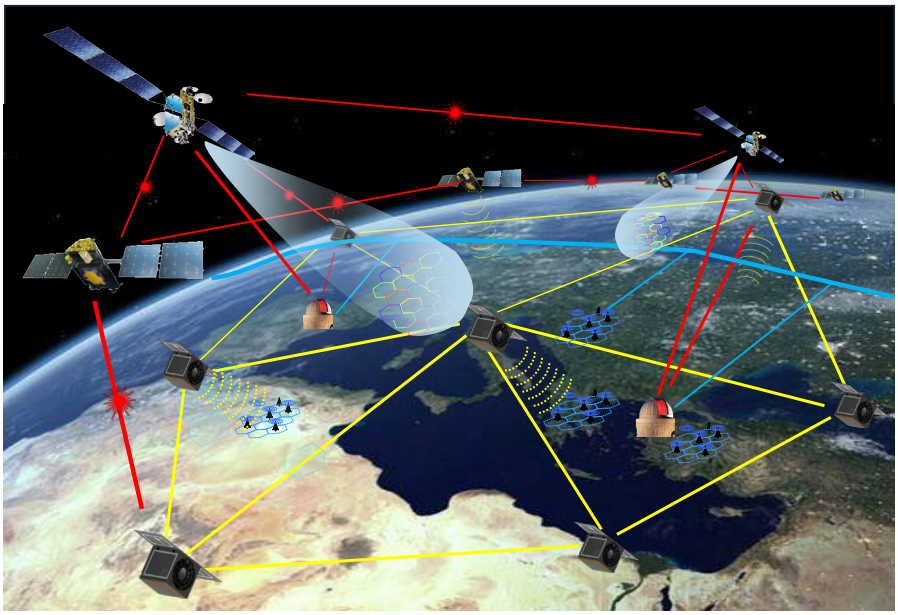


FIG. 20.1 RAPPRESENTAZIONE DI RETE INTERCONNESSA TRA SATELLITE E RETI TERRESTRI CON TECNOLOGIA ANCHE OTTICA (CREDIT THALES ALENIA SPACE)

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 telecomunicazioni 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 no-

tevole *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.

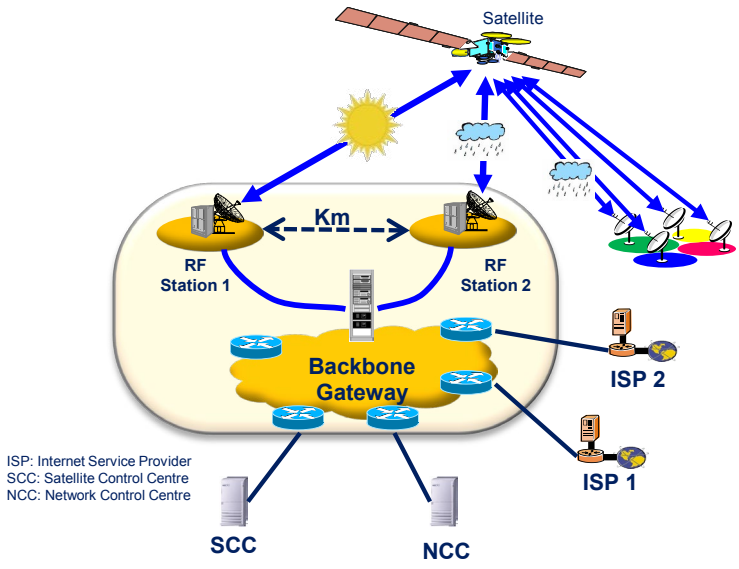


FIG. 20.2 DIVERSITÀ GEOGRAFICA PER GARANTIRE LA CONNETTIVITÀ DEL FEEDER-LINK IN BANDA Q/V

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

DESCRIZIONE

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

DESCRIZIONE

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).

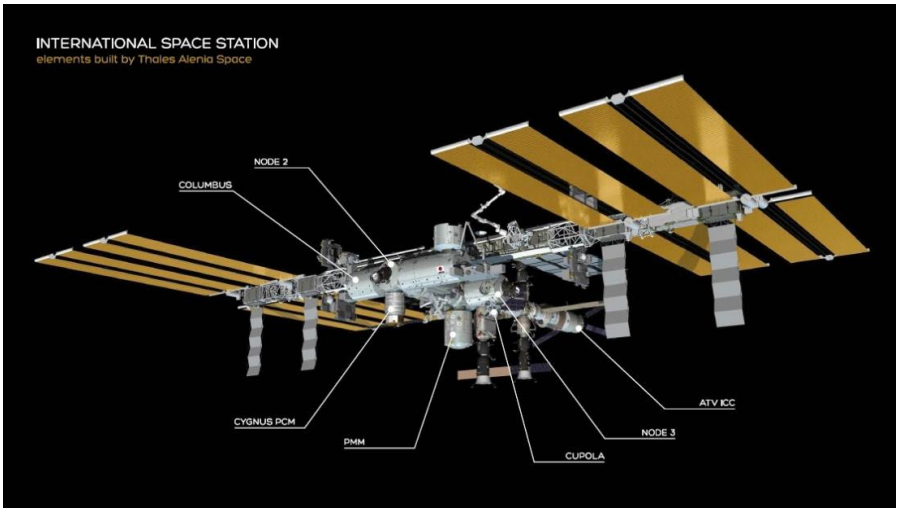


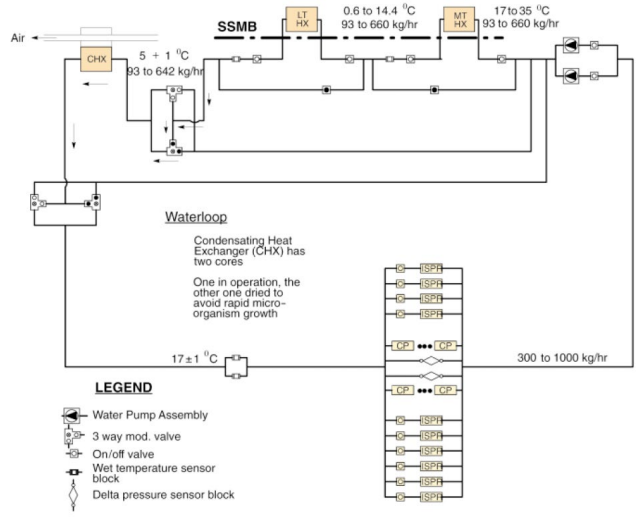
FIG. 22.1 ELEMENTI PRESSURIZZATI E ABITABILI COSTRUITI DA THALES ALENIA SPACE IN ITALIA, A DIMOSTRAZIONE DELLA FORTISSIMA PRESENZA NAZIONALE NELL'AMBITO DELLE INFRASTRUTTURE ORBITALI E DEI SISTEMI DI ESPLORAZIONE (CREDIT THALE ALENIA SPACE).

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.

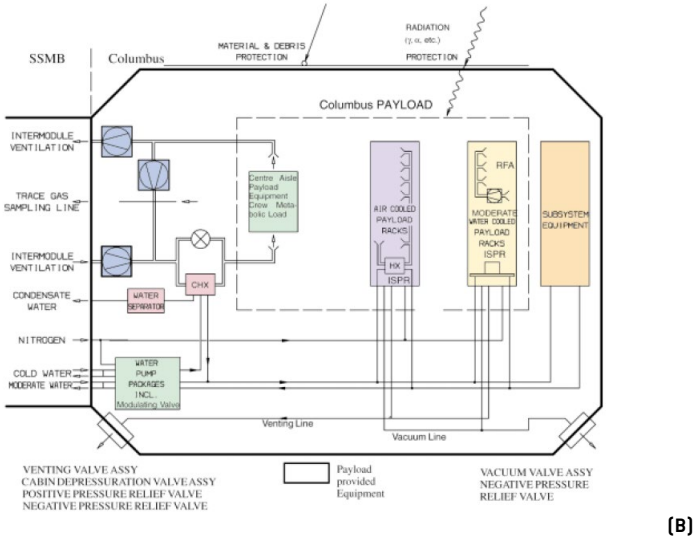
Negli ultimi anni sta prendendo nuovo slancio, sia a livello istituzionale sia a livello commerciale, l'**espansione della presenza umana in avamposti orbitali**. I futuri avamposti sono localizzati sia in orbita bassa terrestre (LEO, *Low Earth Orbit*), sia in orbite cislunari.

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.

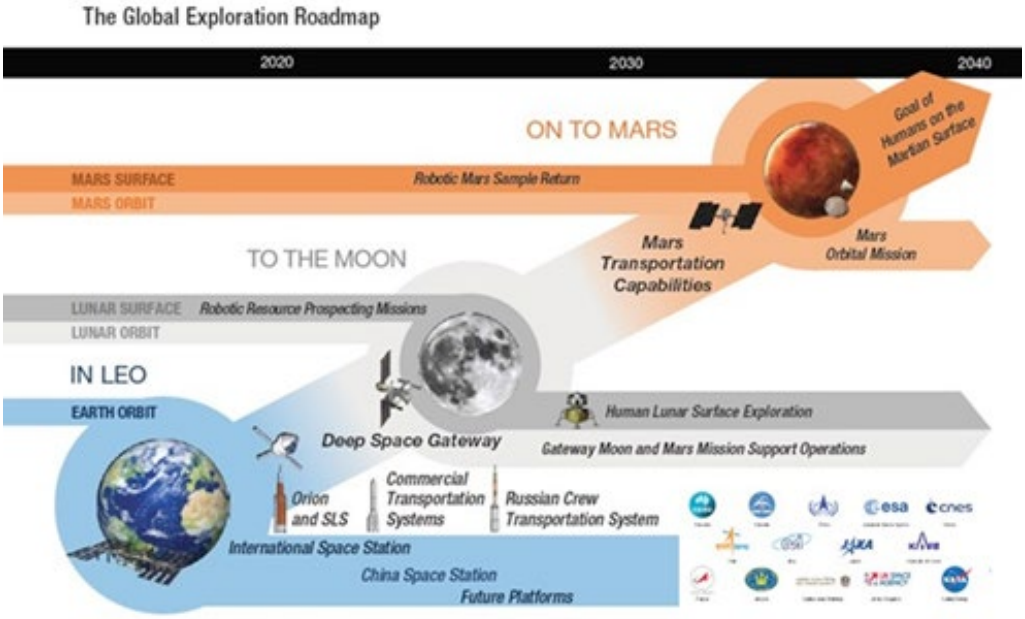


FIG. 22.4 PANORAMICA DELLA GLOBAL EXPLORATION ROADMAP (CREDIT ISECG).

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

DESCRIZIONE

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.

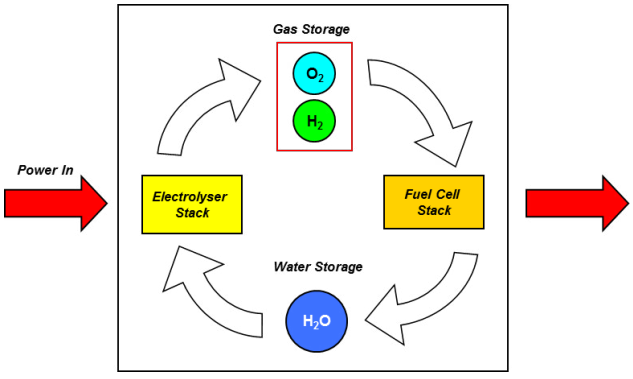


FIG. 23.1 PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DELLE FUEL CELLS RIGENERATIVE

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

DESCRIZIONE

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.

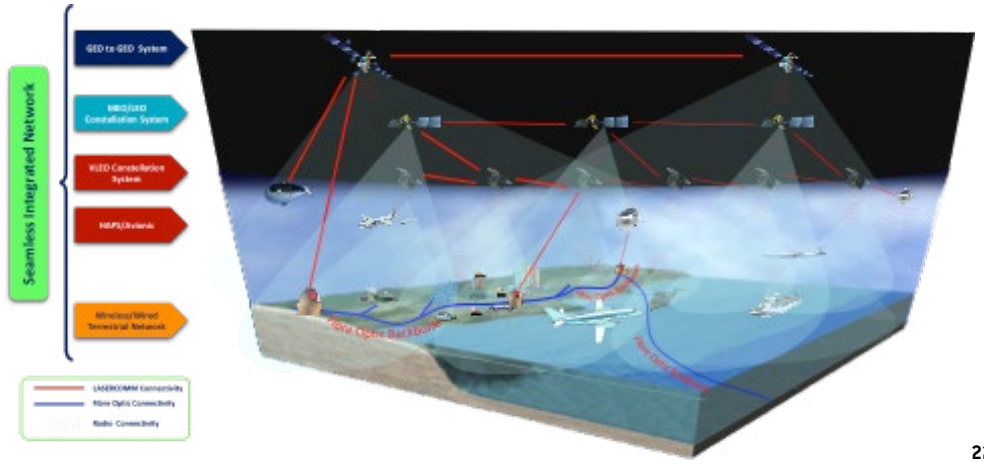


FIG. 24.3 RETE "TRASPARENTE" INTEGRATA TRA SPAZIO E TERRA (AUTHOR: V. SCHENA)

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.

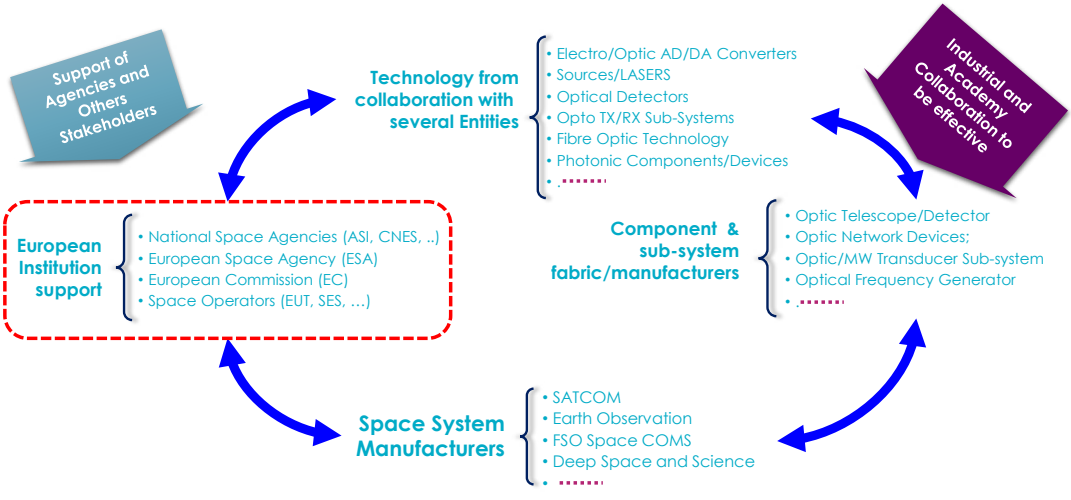


FIG. 24.4 ROADMAP DI SVILUPPO COLLABORATIVO PER LA TECNOLOGIA OTTICO-FOTONICA

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.

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 per 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 978-88-98935-321

9 788898 935321 Euro 15