AIRI - ASSOCIAZIONE ITALIANA PER LA RICERCA INDUSTRIALE

LE INNOVAZIONI DEL PROSSIMO FUTURO

XI EDIZIONE 2025

SPAZIO





Airi
ASSOCIAZIONE ITALIANA PER LA RICERCA INDUSTRIALE
1974-2024

AGRA

AIRI - ASSOCIAZIONE ITALIANA PER LA RICERCA INDUSTRIALE

Airi – Associazione Italiana per la Ricerca Industriale, rappresenta da 50 anni un punto di riferimento per il sistema italiano della ricerca industriale.

Dal 1974 opera come associazione senza scopo di lucro con l'obiettivo di sostenere la ricerca, l'innovazione, lo sviluppo tecnologico e il relativo trasferimento di conoscenze e promuove un'innovazione che contemperi il valore economico, il valore ambientale e quello sociale.

Rappresenta e supporta un'ampia rete di soci tra Industrie, PMI, Enti di ricerca pubblici, Università, Organismi di ricerca e Società di consulenza, permettendo lo scambio di esperienze e di buone prassi nella ricerca industriale.

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.

www.airi.it

LE INNOVAZIONI DEL PROSSIMO FUTURO

XI EDIZIONE

UNA PUBBLICAZIONE DEL GRUPPO DI LAVORO AIRI TECNOLOGIE PRIORITARIE

SPAZIO

PARTE 1: PROFILO DI SETTORE
PARTE 2: SCENARI TECNOLOGICI

AIRI - ASSOCIAZIONE ITALIANA PER LA RICERCA INDUSTRIALE

LE INNOVAZIONI DEL PROSSIMO FUTURO
XI edizione Settore: Spazio

ISBN 978-88-98935-75-8
copyright © 2025 Airi
Associazione Italiana per la Ricerca Industriale
viale Aventino, 102 00153 Roma tel +39 068848831 e-mail info@airi.it www.airi.it

finito di stampare
nel mese di luglio 2025
Realizzazione editoriale
Airi
progetto grafico
Goodlab srl (www.goodlab.it)

Edizioni:
Agra Editrice srl, Roma (www.agraeditrice.it)

Disponibile in versione online su
www.airi.it

Attribuzione-Non Commerciale-Non Opere Derivate 4.0
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/

indice - profilo di settore

PREFAZIONE 9

INTRODUZIONE 11

MEMBRI DEL GRUPPO DI LAVORO profilo di settore 17

MEMBRI DEL GRUPPO DI LAVORO scenari tecnologici 18

INTRODUZIONE 23

QUADRO NORMATIVO NAZIONALE 27

MERCATO 31
Contesto globale 31
Contesto Europeo 33
Contesto Nazionale 35

RICERCA E SVILUPPO 39

LA STRATEGIA NAZIONALE 41

GLI SCENARI TECNOLOGICI 43

indice - scenari tecnologici

SCIENZA ED ESPLORAZIONE

1. TECNOLOGIE PER MISSIONI "DRAG FREE" 53

2. TECNOLOGIE PER LO STUDIO E IL MONITORAGGIO DEL SOLE 59

3. ROBOTICA E INTELLIGENZA ARTIFICIALE PER L'ESPLORAZIONE SPAZIALE 65

PROTEZIONE ASSETS SPAZIALI

4. TECNOLOGIE E APPLICAZIONI PER LA SICUREZZA NELLO SPAZIO 77

5. TECNOLOGIE DI CYBERSECURITY PER LA PROTEZIONE DEI SISTEMI SPAZIALI 93

6. SISTEMI AVANZATI PER INTEGRAZIONE, RIFORNIMENTO, TRASPORTO RIMOZIONE SATELLITI/DETRITI IN ORBITA 105

SISTEMI E SENSORI A BORDO DI SATELLITI

7. TECNOLOGIE PER ANTENNE A BORDO DI SATELLITI 117

8. TECNOLOGIE ED APPLICAZIONI INNOVATIVE PER MINI E MICRO-SATELLITI 127

9. TECNOLOGIE PER RADAR DA OSSERVAZIONE DELLA TERRA 145

10. EDGE COMPUTING PER LO SPAZIO 161

11. TRATTAMENTO DI IMMAGINI RADAR E DI DATI/SEGNALI BASATE SU INTELLIGENZA ARTIFICIALE 169

GUIDA E NAVIGAZIONE SATELLITARE

12. GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS (GNSS) 183

13. OROLOGI ATOMICI SPAZIALI NEXT GENERATION 193

indice - scenari tecnologici

TELECOMUNICAZIONI

14. LE RETI DI COMUNICAZIONE NELLO SPAZIO DEL FUTURO: PROTOCOLLI 5G NR NTN E 6G 203

15. LE TECNOLOGIE OTTICO-FOTONICHE 211

16. GESTIONE E TRASMISSIONE DATI AD ALTISSIMA VELOCITÀ PER LE MISSIONI DI OSSERVAZIONE DELLA TERRA 219

17. COMUNICAZIONI QUANTISTICHE 225

PROPULSIONE E PROPELLENTI

18. TECNOLOGIE PER LA PROPULSIONE SPAZIALE 245

19. NUOVI PROPELLENTI SOLIDI 299

20. SERBATOI E STRUTTURE DI NUOVA GENERAZIONE PER LANCIATORI E VEICOLI SPAZIALI 303

TRASPORTO SPAZIALE

21. TECNOLOGIE PER L'ACCESSO ALLO SPAZIO 327

22.TECNOLOGIE PER IL RIENTRO ATMOSFERICO 343

MATERIALI E PROCESSI

23. ARCHITETTURE STRUTTURALI AVANZATE ULTRALEGGERE E ADATTIVE 379

24. ADDITIVE MANUFACTURING 391

Prefazione

Da oltre venticinque anni, Airi coinvolge manager e ricercatori provenienti da alcune delle principali imprese, centri di ricerca e università, italiane per identificare e analizzare quali siano le tecnologie ad alto impatto socioeconomico destinate a trasformare il sistema industriale.
Giunto alla XI edizione, il Rapporto Airi Le Innovazioni del Prossimo Futuro è uno studio di technology assessment e foresight unico a livello nazionale. E un quadro aggiornato degli scenari tecnologici che contribuiranno, nel breve-medio periodo e in maniera trasversale e abilitante, all'innovazione nei principali settori produttivi.
Dieci settori e oltre 130 scenari tecnologici che fotografano la ricerca industriale italiana, che da sempre ha una significativa propensione all'esportazione nel mondo della tecnologia.

Il presente volume monografico è dedicato al settore dello Spazio.

L'impegno e gli investimenti in Ricerca e Innovazione aiutano le imprese a adattarsi alle rapide dinamiche del contesto socioeconomico e ai mutamenti della domanda. Oggi più che mai, la tecnologia è il fulcro della competitività del sistema Paese, condizionando in modo decisivo le traiettorie di crescita, innovazione e autonomia strategica. Le scelte di oggi determineranno la posizione del sistema Paese nelle diverse catene del valore globali per i prossimi anni, se saremo in grado di presidiare le nostre nicchie e posizioni da leader o se ci riserva un futuro da follower.

Lo studio si propone come una guida per i decision-maker di istituzioni, industrie e investitori, con l'obiettivo di anticipare e comprendere l'evoluzione del futuro tecnologico e i suoi impatti più rilevanti sulla società.

Nel corso degli anni, le analisi condotte da Airi hanno identificato in anticipo numerose tecnologie, oggi ritenute ad alto impatto e abilitanti per l'innovazione. Si ricordano ad esempio Internet of Things e Intelligenza Artificiale, già presenti nella edizione 2012 e poi diventate sempre più significative in termini di applicazioni e impatti nelle successive analisi (2016, 2020) e con un ruolo determinante in diversi dei

settori della presente edizione.
L'obiettivo del nostro lavoro è stimolare una riflessione puntuale sulle priorità, le risorse, gli strumenti più opportuni per promuovere uno sviluppo sostenibile a livello sociale, ambientale ed economico. Per un futuro tecnologico promettente è necessario lavorare insieme – istituzioni, imprese e ricerca pubblica – per comprendere e condividere gli asset e le risorse su cui investire. Aggiungo che gli scenari descritti nei volumi hanno anche un significativo valore per le Istituzioni educative come materiali di orientamento e di formazione nell'istruzione tecnico scientifica.

Un sentito ringraziamento ai coordinatori di settore, ai numerosi esperti, ai soci e non soci, e allo staff Airi, che hanno generosamente messo a disposizione il loro tempo e le loro competenze. Senza il loro contributo, la loro competenza e le loro visioni, la realizzazione di questo studio non sarebbe stata possibile.
Tutti nutrono la speranza che questo sforzo possa essere utile ai Programmi operativi e alle prossime Strategie europee, e possa essere utile indicazione per le Istituzioni di ricerca che devono programmare linee di ricerca coerenti con le future sfide della nuova industria.
È un contributo collaborativo alla cultura industriale del Paese che ci rende particolarmente orgogliosi.

Andrea Bairati, Presidente Airi

Introduzione

Il Rapporto «Le Innovazioni del prossimo futuro», giunto all'undicesima edizione, riporta a cadenza regolare dal 1995 le previsioni tecnologiche che Airi elabora grazie al contributo delle imprese, degli enti di ricerca, delle istituzioni finanziare associati, in collaborazione con qualificati partner pubblici e privati. È uno studio di *technology assessment* e di f*oresight* che svolge un'analisi di tecnologie e famiglie di tecnologie ad alto impatto socioeconomico su dieci settori produttivi di rilievo per l'economia nazionale. L'analisi di tipo verticale (per settore) viene poi integrata da una valutazione complessiva (orizzontale) delle sinergie, convergenze e trasversalità delle tecnologie selezionate lungo tutti i settori produttivi.

Come nella precedente edizione, pur mantenendo la tradizionale impostazione per settori produttivi, abbiamo diviso il rapporto in due parti: nella prima analizziamo la posizione della ricerca industriale italiana rispetto alla competitività globale e la relazione tra sviluppo tecnologico e sostenibilità; nella seconda illustriamo le azioni e gli investimenti che il nostro sistema industriale sta definendo, anche in collaborazione con gli attori più significativi della ricerca pubblica.

I settori che analizziamo in questa edizione sono dieci: Ambiente e transizione circolare, Costruzioni, Chimica e Materiali, Energia e Decarbonizzazione, Farmaceutica, Meccatronica, Microelettronica e semiconduttori, Tecnologie Digitali, Trasporti e Mobilita, Spazio.

Per ogni settore, sono riportati il quadro o profilo generale che lo caratterizza (imprese, mercato, occupazione, tendenze e criticità, impatti socioeconomici, investimenti in R&S) e gli scenari tecnologici (descrizione, motivazioni per lo sviluppo, stato dell'arte, risorse economiche necessarie) sui quali il sistema della ricerca industriale italiana intende concentrare risorse economiche e intellettuali nel breve-medio periodo.

La definizione di tecnologie prioritarie

Le tecnologie prioritarie sono definite come tecnologie ad alto impatto socioeconomico per il tessuto imprenditoriale e l'economia nazionale. Sono tecnologie abilitanti e sistemiche su catene del valore legate a uno o più settori produttivi, caratterizzate da un rilevante impatto rispetto a una o più delle seguenti dimensioni: industriale (investimenti, capacità abilitante), politico ed economico (es. competitività,

lavoro, politiche di investimento), sostenibilità etico, sociale e ambientale, implicazioni legali (es. necessità o capacità di rispondere a sfide e driver normativi).

I criteri di selezione

Abbiamo individuato oltre 130 tecnologie su dieci settori produttivi analizzati , quasi sempre presentate e raggruppate in scenari tecnologici che fungono da famiglia di riferimento o cluster, attraverso i seguenti criteri:

- Impatto politico ed economico
- Impatto industriale
- Innovatività e time to market
- Impatto etico, legale, sociale e ambientale

Il nostro obiettivo è stato di identificare tecnologie e famiglie di tecnologie con un carattere abilitante per una o più catene del valore e sistemi dell'innovazione. L'orizzonte applicativo o di lancio della ricerca che mette a punto la tecnologia è nel breve medio termine (indicativamente 1 -3 anni, anche a seconda delle caratteristiche del settore), pur non trascurando eventuali tecnologie dirompenti con un ciclo di sviluppo più lungo.

Le tecnologie individuate nelle precedenti edizioni sono state utilizzate come uno dei riferimenti iniziali dello studio, riconoscendo il valore che hanno i dati storici nella validità e affidabilità degli studi *foresight* (la presenza di un ambito tecnologico nel corso di più edizioni dello studio, nelle sue diverse declinazioni e livelli di sviluppo, ne conferma l'importanza).

A chi è rivolto lo studio?

La pubblicazione è rivolta a direttori e manager della ricerca pubblici e privati, ricercatori, istituzioni, investitori, *opinion leader*. Il nostro obiettivo è fornire una guida per le strategie e gli investimenti privati e pubblici in ricerca e innovazione e stimolare una riflessione sulle priorità, le risorse, gli strumenti più opportuni per promuovere uno sviluppo sostenibile a livello sociale, ambientale ed economico.

La metodologia

Lo studio è realizzato mediante l'impegno diretto di esperti della rete Airi, soci e non soci, che nel loro insieme hanno competenze approfondite e riconosciute in relazione

sia ai settori produttivi sia alle diverse tecnologie trattate.
Le attività iniziano con la scelta dei coordinatori dello studio, indicativamente due per settore, nominati in accordo con il Consiglio Direttivo di Airi. Viene costituito quindi il Board dei coordinatori settoriali, che rappresenta il primo nucleo del Gruppo di Lavoro (GdL) Tecnologie Prioritarie. Il coordinamento del GdL è a cura di Airi.
Prima fase: Gruppo di Lavoro e selezione delle tecnologie
Il Gruppo di Lavoro, composto inizialmente dai coordinatori, svolge una prima analisi delle tecnologie da trattare. Vengono considerate diverse fonti, quali piani strategici di sviluppo a livello industriale e politiche per la ricerca e innovazione europee e nazionali. Come dato storico si utilizza il catalogo delle tecnologie trattate nell'edizione precedente (2020). Il coinvolgimento della compagine associativa permette di raccogliere suggerimenti per definire il nuovo catalogo delle tecnologie e gli esperti da coinvolgere.
Vengono riviste le definizioni, la struttura, i modelli da utilizzare per lo svolgimento dello studio.
I risultati della prima fase sono un primo catalogo di tecnologie suddivise per settore, un elenco di esperti collegati a tali tecnologie e settori, delle linee guida condivise per la preparazione dello studio.
Seconda fase: Elaborazione dei profili di settore e degli scenari tecnologici.
I lavori vengono svolti principalmente a livello settoriale. Sulla base del catalogo di tecnologie selezionate nella prima fase, coordinatori ed esperti di ciascun settore si incontrano ed elaborano una versione sintetica degli scenari tecnologici. Il Board dei coordinatori supervisiona regolarmente il programma di attività e fornisce eventuali suggerimenti sulle scelte prese a livello settoriale. Il processo è iterativo, durante l'analisi è possibile rivedere, eliminare o aggiungere tecnologie ed includere, ove necessario, altri esperti.
Il risultato della seconda fase è una prima versione del profilo di settore e degli scenari tecnologici.
Terza fase: Revisione ed integrazione
Il GdL svolge un'attività di revisione complessiva dal punto di vista sia tecnico-

scientifico sia editoriale. L'obiettivo è di arricchire ed integrare i singoli scenari e valutare sovrapposizioni e sinergie tra i diversi settori. Si cerca inoltre, per quanto possibile data la diversità dei temi affrontati e le diverse esigenze settoriali in termini di granularità e di tempi, di dare uniformità al lavoro nel suo complesso.

Il profilo di settore e gli scenari tecnologici vengono rivisti e finalizzati. Il risultato sono le bozze finali del lavoro. Viene infine svolta una revisione editoriale dei singoli capitoli e preparato l'impaginato finale.

Il processo sopra riportato è indicativo e alcune fasi del lavoro sono svolte in parallelo. I lavori di preparazione dell'intero volume, comprensivo dei dieci settori produttivi, si svolgono in un periodo di circa due anni.

Questa edizione dello studio Airi ha coinvolto oltre 180 esperti, tra coordinatori e membri dei gruppi di lavoro settoriali, che sono riportati nelle prime pagine dei capitoli relativi a ciascuno dei diversi settori.

Per la presente edizione, si è scelto di pubblicare in anteprima alcuni dei settori nella forma di volume monografico.

Le limitazioni dello studio

Il lavoro è il risultato delle competenze e della visione di Airi e degli esperti coinvolti nello studio, che determina la tipologia e ampiezza degli ambiti trattati, tra cui in particolare la scelta dei settori e degli scenari tecnologici.

A titolo di esempio, in questa edizione non viene trattato in maniera approfondita il settore agroalimentare (se non come ricaduta di alcune tecnologie settoriali), che invece è di evidente rilievo per l'economia nazionale.

L'approfondimento dei temi trattati è limitato dalla necessità di contenere sia la lunghezza sia l'impegno richiesti dallo studio, anche considerata la partecipazione a carattere volontario di tutti gli esperti coinvolti.

Sono utilizzati dati provenienti da un numero selezionato e limitato di fonti bibliografiche, sia pubbliche sia provenienti da dati interni delle aziende e centri di ricerca coinvolti, che coprono l'intero spettro dei settori selezionati ma che non si possono considerare esaustive.

I contenuti e le opinioni espresse sui possibili scenari di sviluppo tecnologico per il

sistema paese rimangono un esercizio di analisi, deduzione e previsione, come tale soggetto a variabilità ed imprecisioni.

I contenuti

Lo studio analizza una parte rilevante del portafoglio tecnologico del sistema paese. Per ogni settore, viene riportato il quadro o profilo generale che lo caratterizza (imprese, mercato, occupazione, tendenze e criticità, impatti socioeconomici, investimenti in R&S) e gli scenari tecnologici (descrizione, motivazioni per lo sviluppo, stato dell'arte, risorse economiche necessarie) sulle quali il sistema della ricerca industriale italiana intende concentrare risorse economiche ed intellettuali nel breve-medio periodo.

La collana "Le Innovazioni del Prossimo Futuro" è costituita da: il volume "Profili di Settore", che raccoglie i profili di settore e l'elenco degli scenari tecnologici dei dieci settori; i dieci volumi monografici, ciascuno con il profilo e la descrizione degli scenari tecnologici del settore considerato.

Il presente volume rappresenta la pubblicazione settoriale dello studio relativa al settore Spazio.

SPAZIO

PROFILO DI SETTORE

MEMBRI DEL GRUPPO DI LAVORO

COORDINATORE

THALES ALENIA SPACE ITALIA	**Antonio Gammarota**

ESPERTI

AGENZIA SPAZIALE ITALIANA (ASI)	**Augusto Cramarossa, Emanuela D'Aversa**

SPAZIO

SCENARI TECNOLOGICI

MEMBRI DEL GRUPPO DI LAVORO

COORDINATORE

THALES ALENIA SPACE ITALIA	**Antonio Gammarota**

ESPERTI

THALES ALENIA SPACE ITALIA	**Stefano Cesare, Andrea Merlo, Massimo Antonacci, Albino Quaranta, Marco Nebiolo, Pasquale Capece, Andrea Torre, Salvatore Corvo, Alessandro Pisano, Roberto Venturini, Ornella bombaci, Rita Roscigno, Carlo Ciancarelli, Oreste Trematerra, Davide Di Ienno, Chiara Giacanelli, Lucia Amorosi, Tiziana D'Ignazio, Niccolò Picci, Francesco Lumaca, Paolo Conforto, Martina Ottavi, Andrea Geraldi, Emanuele Cerqueti, Enrico Varriale, Vincenzo Schena**
CIRA	**Antonio Concilio, Felice De Nicola, Mario De Stefano Fumo, Sara Di Benedetto, Ignazio Dimino, Francesco Battista, Roberto Gardi, Giuseppe Giusto, Marco Marini, Mario Panelli, Antonio Schettino, Giuseppe C. Rufolo, Paolo Vernillo**
LEONARDO	**Carlo Cavazzoni, Antonio Sciarappa, Guido Sangiovanni, Enrico Suetta, Sandro Panagini**

SPAZIO

SCENARI TECNOLOGICI

MEMBRI DEL GRUPPO DI LAVORO

ISTITUTO ITALIANO DI TECNOLOGIA	**Remo Proietti Zaccaria**
AVIO	**Attilio Cretella, Valeria Cherubini**
TELESPAZIO	**Stefano Beco, Andrea Cardellicchio, Carlo Albanese**
POLITECNICO DI MILANO	**Pierluigi Di Lizia**
UNIVERSITA' FEDERICO II Napoli	**Antonio De Maio**
D-ORBIT	**Stefano Antonetti**
GMSPAZIO	**Filippo Gemma**
PLANETEK	**Cristoforo Abbattista, Leonardo Amoruso Vito Fortunato, Luca Pascali**
ARGOTEC	**Alessandro Balossino**
SITAEL	**Giovanni Cesaretti, Stefan Gregucci**
MIPRONS	**Angelo Minotti**
T4i	**Marco Manente, Daniele Pavarin**
AEROSPAZIO TECNOLOGIE	**Francesco Marconcini, Fabrizio Scortecci**



SETTORE

SPAZIO

PROFILO DI SETTORE

INTRODUZIONE

Lo Spazio ha acquisito, negli ultimi anni, un'importanza crescente a livello politico, sia in Italia che in Europa, grazie alla sua sempre maggiore rilevanza strategica ed economica. Di conseguenza, è notevolmente aumentata l'attenzione nel definire e attuare una politica spaziale di eccellenza, per permettere al nostro Paese e all'Europa di giocare, su scala mondiale, un ruolo paragonabile a quello delle nazioni leader nel settore spaziale.

Due fattori fondamentali stanno ridefinendo l'equilibrio geopolitico e tecnologico nello Spazio: l'ingresso di attori privati nel settore e il deterioramento dei rapporti tra Russia e Occidente, sfociato nella guerra in Ucraina.
Negli ultimi anni, lo Spazio non è più un dominio esclusivo degli Stati, ma ha visto il crescente coinvolgimento delle aziende private, grazie alle innovazioni tecnologiche e a nuovi modelli di business. Le reti di satelliti privati (come Starlink, OneWeb, ecc.) forniscono servizi di comunicazione e internet, con impatti significativi sulla sicurezza e sull'economia globale.

Le aziende private stanno assumendo un ruolo strategico nelle missioni spaziali, spesso adottando un paradigma diverso rispetto a quello utilizzato nei programmi spaziali istituzionali tradizionali. Il mercato spaziale è unanimemente riconosciuto per la sua grande rilevanza strategica e registra una costante crescita, alla luce della vasta gamma di ricadute in termini di accesso e utilizzo dello Spazio, sviluppo della conoscenza, innovazione tecnologica, sicurezza, ritorni economici e crescita della competitività industriale.

In particolare, lo Spazio svolge un ruolo trainante (sia diretto che indiretto) nelle economie dei Paesi più industrializzati, grazie alla sua riconosciuta capacità di stimolare in modo significativo la ricerca scientifica e il progresso tecnologico. Questi, a loro volta, sono fattori fondamentali per lo sviluppo economico e industriale degli Stati più avanzati.

Il settore spaziale sta acquisendo sempre maggiore importanza a livello globale, anche grazie alla sua influenza su temi quotidianamente trattati dai media, che hanno un impatto diretto sulla vita dei cittadini. Lo Spazio è considerato uno strumento fondamentale per affrontare i cambiamenti globali, in quanto fornisce i servizi necessari a rispondere alle crescenti esigenze sia governative che dei cittadini. Tra i principali ambiti di applicazione possiamo citare, a titolo esemplificativo: i cambiamenti climatici, la gestione sostenibile delle risorse, le telecomunicazioni, la geolocalizzazione, il controllo del territorio e degli spazi aeromarittimi, la sicurezza e la difesa.

In questo contesto, il clima di instabilità geopolitica ha spinto i governi a potenziare il settore spaziale, riprendendo l'approccio di "deterrenza e superiorità" tipico degli anni della Guerra Fredda. La guerra in Ucraina ha ulteriormente accelerato la consapevolezza dell'importanza delle tecnologie dual-use, evidenziando il ruolo cruciale dello Spazio nella sicurezza globale e intensificando la corsa all'autonomia strategica.
Quanto sopra sottolinea e rafforza la necessità di disporre di una comunità scientifica e accademica e di un comparto industriale legato allo Spazio (incluse le PMI) di valore adeguato, in linea con il ruolo che il nostro Paese intende assumere. L'Italia, infatti, è tradizionalmente tra i Paesi con i maggiori interessi e contributi nel settore spaziale.

L'Italia vanta una lunga tradizione nell'esplorazione spaziale, che ha avuto inizio nel 1964, quando divenne il terzo Paese al mondo a lanciare e gestire un satellite in orbita. La nascita dell'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) nel 1988 segna l'inizio di un impegno strutturato e strategico nel settore spaziale, sottolineando la necessità di un coordinamento unificato delle attività di ricerca e industriali che si erano sviluppate sin dagli anni '60.
In questo contesto, **l'industria spaziale italiana** gioca un ruolo significativo in vari ambiti e applicazioni delle attività spaziali a livello europeo e mondiale, grazie al

coinvolgimento attivo di università, centri di ricerca e una vasta rete di piccole e medie imprese specializzate. Tra gli esempi rilevanti, ma non esaustivi, si possono citare la progettazione, lo sviluppo e la costruzione di:

- **Satelliti Scientifici e Applicativ**i nei domini delle Telecomunicazioni, dell'Osservazione della Terra e della Navigazione;
- **Satelliti e Strumenti Scientifici** per la conoscenza dell'Universo e l'Esplorazione del Sistema Solare;
- I**nfrastrutture 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**, che comprendono l'integrazione di infrastrutture e gli asset nazionali esistenti e futuri per la previsione e il monitoraggio di collisioni con detriti e oggetti spaziali, della loro frammentazione e del loro rientro incontrollato verso la Terra;
- **Sistemi Software** sicuri, ad elevato grado di affidabilità, specifici per il settore spaziale.

È fondamentale ottimizzare il **coordinamento tra tutte le componenti nazionali** per inserirsi efficacemente nel nuovo contesto mondiale ed europeo, garantendo all'Italia un ruolo competitivo nelle sfide internazionali emergenti.

Lo Spazio non è più solo un settore altamente specializzato con una forte connotazione tecnico-scientifica, ma si sta sempre più orientando verso la fornitura di applicazioni e servizi destinati principalmente al benessere dei cittadini. Infatti, i programmi spaziali, grazie ai dati satellitari disponibili e all'integrazione crescente degli sviluppi scientifici e tecnologici, sono in grado di sviluppare applicazioni e offrire servizi utili per i cittadini, le imprese e le Pubbliche Amministrazioni, rispondendo a una domanda pubblica e privata in continua crescita.

Inoltre, i programmi spaziali rappresentano un importante strumento per accrescere la visibilità internazionale dell'Italia e costituiscono un valido supporto per la politica estera nazionale, sia nei forum internazionali che nelle relazioni bilaterali con 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 e industriale del settore, sia attraverso specifiche iniziative nazionali che con la sua attiva partecipazione in **ESA (Agenzia Spaziale Europea)** e in programmi congiunti con la NASA e altre **Agenzie Spaziali**.

QUADRO NORMATIVO NAZIONALE

In tale contesto si inquadrano gli interventi di riorganizzazione della Governance nazionale per lo Spazio e l'Aerospazio con le leggi n.7/2018 e n. 79 del 29 giugno 2022, che forniscono disposizioni concernenti l'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. Il Presidente del Consiglio dei Ministri ha inoltre poteri di indirizzo, coordinamento, programmazione e vigilanza nei confronti dell'ASI, mentre il Ministero dell'Università e della Ricerca ha poteri di indirizzo strategico limitatamente all'attività di ricerca scientifica svolta dall'ASI.

Questa rinnovata governance istituisce presso la Presidenza del Consiglio il "**Comitato interministeriale per le politiche relative allo Spazio e all'Aerospazio" (COMINT)** con il compito di elaborare le strategie governative e Industriali dei settori spaziale e aerospaziale. Il **COMIN**T 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.

Tuttavia, il quadro normativo nazionale e internazionale nel settore spaziale non è ancora del tutto strutturato. Al fine di colmare questo vuoto nell'ordinamento giuridico, il Consiglio dei Ministri ha approvato nel giugno del 2024 la **prima legge quadro italiana sullo Spazio e sulla Space Economy**, ora al vaglio del Parlamento per la sua approvazione definitiva. La legge intende supportare un miglior posizionamento competitivo dell'Italia e definisce regole per i principali

attori spaziali. La legge definisce anche le principali traiettorie di sviluppo dell'economia spaziale colmando un vuoto normativo nazionale e offrendo un quadro di riferimento, contributi di principi e regole basati sull'esperienza nazionale alla nuova legge europea per lo Spazio.

La nuova legge europea per lo Spazio, ancora in discussione, mira infatti a creare un quadro normativo unificato (basato sull'articolo 114 – Mercato unico, ma che deve rispettare gli articoli 4 e 189 del Trattato) che regolamenti le attività spaziali in tutti gli Stati Membri introducendo nuove regole per la gestione del traffico spaziale, la riduzione dei detriti e la responsabilità degli operatori e puntando a una maggiore autonomia strategica dell'UE e a un maggiore coordinamento tra ESA ed EUSPA (Agenzia dell'Unione Europea per il Programma Spaziale). La proposta è ancora in fase di discussione e potrebbe essere approvata entro il 2025. Una volta adottata, la legge europea potrebbe richiedere un coordinamento giuridico con le normative nazionali in vigore, per garantire coerenza e uniformità nell'applicazione delle regole spaziali all'interno dell'UE. Questo processo di armonizzazione è essenziale per evitare conflitti normativi e promuovere una governance spaziale efficace a livello europeo.
L'ASI è l'Agenzia pubblica nazionale preposta a proporre, coordinare e gestire programmi spaziali nazionali e la partecipazione italiana a progetti spaziali europei e internazionali, sotto la supervisione del COMINT e in conformità con gli indirizzi governativi, recentemente approvati, e dei conseguenti documenti strategici previsti dalla legge, ora in fase di preparazione. L'ASI mantiene rapporti con tutti i diversificati gruppi di interesse – Università e Centri di Ricerca spaziali, imprese (attraverso il Tavolo Permanente Imprese) e relative associazioni, cluster regionali, Ministeri a più titoli coinvolti nel settore, Enti locali e regionali – allo scopo di promuovere e coordinare la ricerca scientifica e lo sviluppo tecnologico, e favorire la crescita di infrastrutture spaziali al servizio del cittadino.

A livello nazionale italiano, una significativa novità riguarda l'elaborazione della nuova Legge Spaziale Nazionale, il cui iter approvativo è in via di finalizza-

zione: questa proposta di legge pone l'Italia all'avanguardia e apre la strada a un confronto anche in ambito internazionale, in particolare suggerendo delle possibili linee guida ai principali attori al fine di regolamentare il settore. La legge prevede di definire alcune fondamentali linee di sviluppo dell'economia spaziale: ad esempio, viene prevista la necessità di un'autorizzazione sia per gli operatori stranieri che intendono condurre attività spaziali dal territorio italiano, sia per quelli nazionali che operano da un territorio estero. L'ASI è incaricata della vigilanza sugli operatori: in caso di non rispetto delle disposizioni di legge o degli impegni presi, l'autorizzazione potrà essere revocata. L'Agenzia si occuperà anche dell'immatricolazione nel Registro nazionale degli oggetti lanciati nello spazio extra-atmosferico per i quali l'Italia è Stato di lancio. L'obbligo di registrazione/immatricolazione da parte di ASI dei satelliti lanciati in orbita (sia pubblici che privati) è stato sottoscritto a livello internazionale tramite il trattato *Convention on Registration of Objects Launched into Outer Space* (1975). Altra importante novità sarà l'obbligo per gli operatori autorizzati di stipulare contratti assicurativi.
La legge prevede, inoltre, l'istituzione di un fondo pluriennale per la promozione delle attività spaziali e norme speciali per agevolare l'accesso delle PMI e delle start-up ai contratti pubblici nel settore aerospaziale e l'elaborazione di un Piano Nazionale per l'Economia dello Spazio su base quinquennale, per valutare e quantificare i bisogni del settore e definire adeguate politiche di intervento.

IL MERCATO

Contesto globale

Le diverse stime del valore della Space Economa livello globale nel 2024 si attestano tra i 450-600B$ (stime di vari studi del settore: ESA, Bryce, Euroconsult, Space Foundation), con una crescita media di oltre il 5% annuo, rispetto al valore medio stimato per il 2019 che si attestava al di sotto dei 400B$. In particolare, secondo Euroconsult (oggi NovaSpace) la *Global Space Economy* ha confermato il trend di crescita costante e ha raggiunto nel 2024 il valore di 596B$, mentre Il World Economic Forum stima una crescita sull'orizzonte del 2035 fino a 1.790B$.

Per il 2023, secondo fonte ESA (*Report on Space Economy*, December 2024) gli **investimenti istituzionali mondiali** nel settore spaziale si sono attestati sui **106B€** (+11% rispetto al 2022), confermando che il settore pubblico, civile e militare, si afferma ancora come il maggiore "cliente" per il settore spaziale. Gli investimenti sono concentrati in **USA (64%), Cina (12%), Europa (11%), e a seguire Giappone (4%), Russia (3%) e India (2%),** laddove tuttavia i dati relativi a Cina e Russia risultano probabilmente sottostimati per mancanza di informazioni pubbliche.

Un dato particolarmente significativo riguarda il 2023, anno in cui, per la prima volta, la spesa pubblica globale per le attività spaziali a scopo di Difesa (pari al 50,2% del totale) ha eguagliato e leggermente superato quella destinata alle attività spaziali civili (49,8%).

Il ruolo dei governi si conferma cruciale, sia come fonte di finanziamento per le attività di ricerca e sviluppo, sia per l'acquisto di prodotti e servizi spaziali. È inoltre importante sottolineare che il numero di Paesi che investono nello Spazio è in costante aumento, a dimostrazione del dinamismo del settore e della crescente consapevolezza da parte dei governi dell'importanza strategica delle applicazioni e tecnologie spaziali per sostenere le politiche pubbliche e lo sviluppo scientifico e tecnologico.
Tuttavia, lo scenario economico internazionale sta cambiando con straordinaria

rapidità a causa dell'ingresso nel mercato spaziale di **nuovi attori privati**. Tra questi figurano aziende statunitensi come SpaceX, Blue Origin e Virgin Galactic, ma anche numerose nuove realtà europee attive nei settori dei servizi di lancio e dei servizi in orbita. A ciò si aggiunge il coinvolgimento di grandi *player* della *New Economy*, come Google e Facebook, nonché di fondi di Venture Capital, che stanno contribuendo a ridefinire le dinamiche del settore.

Al contrario, gli investimenti privati globali nel settore spaziale hanno continuato a diminuire anche nel 2023, attestandosi a circa 6B€. Questo rappresenta un calo del 32% rispetto al 2022 e un calo del 51% rispetto al massimo storico di 12B€ che ha segnato il 2021. *Le space companies* di tutto il mondo hanno ricevuto investimenti privati attraverso 266 round di finanziamento nel 2023: una diminuzione del 9% del volume rispetto al 2022. Anche l'Europa ha registrato un calo, con investimenti privati totali di meno di 980 milioni di euro, in calo del 14% rispetto al 2022. Diversi fattori stanno determinando una diminuzione a livello globale, incluso il ridotto accesso al *Venture Capital* (VC, in calo del 18% rispetto al 2022 ma che rappresenta ancora il 73% del totale valore dei deal nel 2023), e il forte calo delle SPAC (*Special Purpose Acquisition Companies*).

Inoltre, nel 2023 si è registrata una notevole assenza di acquisizioni importanti, con solo 20 transazioni registrate (19 in meno rispetto al 2022). Il *debt financing* è aumentato inoltre del 53% dal 2022, evidenziando un notevole cambiamento nella raccolta fondi in questo settore.

Osservando i dati relativi al numero dei lanci a livello globale, si registrano nel 2023 un totale di 221 lanci, dei quali oltre il 50% da parte degli USA (e di questi l'84% da parte di SpaceX), e il 30% da parte della Cina. Osservando ancora i dati dal punto di vista del numero di satelliti a livello globale, si registrano 2.940 satelliti lanciati, ed è significativo rilevare che il 63% di essi appartengono alla classe inferiore ai 500kg. Inoltre, si registra un ritorno anche alla classe di satelliti più 'grandi',

che invece nei precedenti 4 anni si erano ridotti drasticamente. Nonostante ciò, i satelliti della costellazione Starlink hanno costituito il 70% della massa lanciata nel 2023 a livello globale.

Ad eccezione degli USA, Russia, Giappone, Francia, Cina ed Europa, l'incidenza del *budget* spaziale sul PIL è, per la maggior parte delle nazioni, inferiore al 0,06% nel 2023 (secondo ESA, *Report on Space Economy, December 2024*). In particolare, il livello Europeo medio si attesta sullo 0,06% con le sole Lussemburgo e Italia (quasi 0.1%) al di sopra di tale valore. 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.

Secondo l'ultimo report di NovaSpace, che quantifica il valore 2024 della *Global Space Economy* a 586B$ come accennato precedentemente, il mercato Spaziale (ossia quello che viene identificato come il "core" della Space Economy, dove attori governativi e players commerciali interagiscono) si attesta a un valore di 224B$, guidato principalmente dalle applicazioni SATCOM (159B$) e applicazioni EO (21B$).

Contesto europeo

I principali attori del settore spaziale europeo sono l'ESA, l'Unione Europea e i rispettivi Stati membri.
Grazie all'azione coordinata di UE ed ESA, l'Europa occupa oggi il terzo posto a livello mondiale per entità del bilancio pubblico destinato allo spazio, preceduta solo dagli Stati Uniti e seguita da vicino dalla Cina. Le attività spaziali europee coinvolgono un ampio numero di Paesi: 27 nell'UE e 23 nell'ESA.

Dal punto di vista economico, nel 2023 gli investimenti pubblici europei nel set-

tore spaziale (comprendenti ESA, UE, Eumetsat e singoli Stati) hanno raggiunto un totale di 11,9 miliardi di euro, registrando una crescita complessiva del 22,7% rispetto al 2018. A questi si aggiungono circa 980 milioni di euro di investimenti privati.

Il valore del mercato europeo "upstream" (cioè, relativo alla costruzione e al lancio di infrastrutture spaziali) è stato stimato nel 2023 in 5,3 miliardi di euro, pari a circa il 10% del mercato globale.
Per quanto riguarda il segmento "downstream" (applicazioni e servizi derivanti dai dati spaziali), il valore del mercato commerciale europeo è stimato in circa 82 miliardi di euro, corrispondenti al 23% del mercato mondiale. I settori trainanti sono le telecomunicazioni e la navigazione, che rappresentano insieme il 66% del totale, seguiti dall'osservazione della Terra.

L'Unione Europea, attraverso la Commissione Europea — che rappresenta l'organo esecutivo responsabile dell'attuazione delle politiche comunitarie — è diventata uno dei principali finanziatori dei programmi spaziali europei e rappresenta oggi 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 B€ circa nel sesto Framework Programme (FP6), relativo agli anni 2002/2006
- oltre 1,4 miliardi di euro nel FP7 (2007/2013)
- 12 B€ nel periodo 2014-2020, in particolare nei programmi faro Galileo e Copernicus e nelle attività spaziali di Horizon 2020;
- 14,6 B€ per il periodo 2021-2027, confermando i 4 grandi programmi Galileo, Copernicus, GovSatCom, Space Surveillance Awareness, e il programma di ricerca e sviluppo Horizon Europe. Nel prossimo ciclo 2028-2034, la Commissione ha già proposto di incrementare gli investimenti nel

programma spaziale per garantire continuità e innovazione nei suoi programmi faro, nonché di ampliare il proprio campo di intervento includendo l'accesso allo spazio e i servizi in orbita (In *Orbit Servicing*).

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.

I dati indicano che ci sono circa 43.000 posti di lavoro diretti nei settori *upstream* e *midstream*[1]. Di questi, circa 36.000 sono generati dall'industria manifatturiera, che crea posti di lavoro altamente qualificati. In particolare, il settore delle comunicazioni satellitari è responsabile per circa due terzi di questi posti di lavoro e svolge un ruolo cruciale nel mantenere e sviluppare il know-how necessario a garantire la competitività, anche nell'ambito industriale.

Nei prossimi anni si prevede che i settori *downstream*, come l'osservazione della Terra e la navigazione satellitare, contribuiranno significativamente all'aumento dell'occupazione. La distribuzione dei posti di lavoro nel settore *upstream* tra gli Stati membri dell'ESA mostra un predominio della Francia, seguita da Germania e Italia.
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.

Contesto nazionale

L'Italia, membro fondatore dell'ESA, è il suo terzo maggiore contribuente (molto vicino al secondo) dopo Francia e Germania, e fra i primi Paesi al mondo per investimenti e capacità in tutti i più importanti settori di attività Spaziali (Osservazione della Terra, Osservazione dell'Universo, Telecomunicazioni, Trasporto spaziale,

[1] *Nella space economy si parla di "upstream" riferendosi al business "verso lo spazio", ricerca, manifattura e produzione di componenti per satelliti, lanciatori e altri velivoli spaziali; per downstream ci si riferisce alle applicazioni che vengono sviluppate a terra partendo dai dati e informazioni raccolti dai dispositivi in orbita, quali elaborazione dei dati stessi, servizi space-based, telecomunicazioni, monitoraggio ambientale, ecc. (OECD (2022), OECD Handbook on Measuring the Space Economy, 2nd Edition, OECD Publishing, Paris). È stato recentemente introdotto anche il termine midstream, in relazione all'insieme delle infrastrutture funzionali alla space economy, quali piattaforme di lancio, centri di controllo, ecc.*

Abitabilità 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.

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 nazionale, infatti, registra la maggiore intensità di ricerca, sia nel confronto con l'intero sistema manifatturiero nazionale, sia con quello delle aziende high-tech. Nell'upstream 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'ASI ha inoltre recentemente concluso un accordo con ISTAT per la realizzazione di un progetto di ricerca concernente la perimetrazione della Space Economy sul territorio nazionale italiano e il suo contributo all'economia nazionale, attraverso la misurazione nel tempo anche delle variazioni delle variabili socioeconomiche collegate alla stessa Economia dello Spazio.

Come detto, l'Italia ha una gamma completa di competenze, dalle Telecomunicazioni al Posizionamento (Galileo, info-mobilità per sicurezza, salute, trasporti), all'Osservazione 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, etc.). A tali competenze corrispondono sistemi produttivi integrati, dalla progettazione alla produzione di materiali speciali, alla realizzazione di prodotti e servizi, alla gestione, interpretazione e distribuzione di dati, articolati nei segmenti di terra, trasporto e orbita/volo.
L'industria spaziale italiana è composta da sistemisti e integratori di sistemi di grandi dimensioni (LSI) e una serie molto più ampia di piccole e medie imprese,

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.
Negli ultimi anni sta crescendo anche la realtà delle start-up attive nel settore spazio, realtà alle quali sono rivolte iniziative specifiche di supporto, sia direttamente tramite ASI (ad es. il programma paneuropeo di accelerazione Spacefounders) che attraverso il supporto nazionale alle specifiche iniziative dell'ESA (ad es. gli incubatori di recente istituiti in diverse regioni italiane - BIC)
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 più di 300 aziende, 3 Associazioni Industriali, 1 Cluster nazionale, 15 distretti aerospaziali regionali, 5 incubatori imprenditoriali dedicati esclusivamente allo Spazio e un insieme di addetti stimato approssimativamente tra i 7-8000 impiegati, con un fatturato complessivo che si stima essere intorno ai 2 miliardi di euro.
Un ristretto numero di grandi gruppi domina 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 Germania e 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 *stakeholde*r, 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 i 15 Distretti aerospaziali, diverse imprese e associazioni Industriali, Enti di Ricerca e ASI, che ha l'obiettivo di assicurare, in una ottica "meta-distrettuale", la coerenza con le strategie nazionali e l'ottimizzazione delle risorse spese, sugli assi cruciali di sviluppo del settore spazio.

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 contributi significativi all'esplorazione spaziale, realizzando strumenti scientifici che hanno viaggiato a bordo delle sonde NASA ed ESA, contribuendo alla scoperta dei segreti di Marte, Giove, Saturno, delle loro lune e delle comete.
Di conseguenza, in tutte le principali missioni pianificate per i prossimi anni – da Venere alle comete, fino ai confini più remoti del nostro Sistema Solare – sarà presente una componente italiana.
Secondo i dati OCSE del 2019, l'Italia si colloca al sesto posto nel mondo per numero di pubblicazioni scientifiche nel settore spaziale, preceduta da Stati Uniti, Cina, Germania, Regno Unito e Francia.

L'analisi bibliometrica, pubblicata nel 2018 dal OECD[2] delle pubblicazioni 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).

[2] *2018 OECD International Survey of Scientific Authors*

LA STRATEGIA NAZIONALE

Il settore spaziale è solidamente strutturato sia a livello di politiche nazionali che sovranazionali. Considerata l'elevata strategicità del comparto, le ampie ricadute delle sue soluzioni tecnologiche, l'orizzonte temporale di lungo periodo e i rilevanti costi associati, la pianificazione strategica e la definizione degli obiettivi risultano particolarmente accurate.

A livello nazionale, in linea con le tendenze europee, le priorità strategiche sono articolate in tre principali aree di intervento. Tali priorità trovano riscontro anche negli *Indirizzi di governo in materia spaziale e aerospaziale*, definiti dal Governo, che l'ASI sarà poi chiamata ad attuare attraverso obiettivi e programmi elaborati sulla base del Documento Strategico di Politica Spaziale Nazionale (DSPSN) approvato dal COMINT.

> L'ampliamento della conoscenza e l'aumento delle opportunità e dei benefici per la società, che si esplica in:
  - sostenere la ricerca scientifica e industriale e moltiplicare le competenze necessarie alla *Space Economy*
  - agire verso una Sostenibilità integrata nel settore spaziale, sviluppando strategie e opportunità per l'Italia
  - garantire la sicurezza dello spazio, delle infrastrutture di rilievo strategico e dei cittadini

> La crescita e la competitività dell'ecosistema industriale legato al settore spaziale, che si esplica in:
  - rafforzare la *leadership* dell'Italia nel settore spaziale, affrontando le sfide per un futuro innovativo
  - sostenere la crescita, il consolidamento e l'internazionalizzazione del tessuto industriale, con particolare attenzione alle PMI e start-up;
  - promuovere l'offerta di capitale di rischio per la crescita imprenditoriale

> La definizione di un contesto regolatorio e di *governance* chiaro e funzionale, che si esplica in:
  - assegnare allo Spazio centralità nelle politiche pubbliche
  - stabilire un quadro normativo e regolatorio favorevole alla competitività del settore spaziale
  - promuovere le relazioni internazionali e la cooperazione
  - elaborare i documenti discendenti

L'ASI, sulla base di questi indirizzi, predisporrà l'aggiornamento della documentazione strategica:

- un Documento strategico di politica spaziale nazionale 2025-2034 (che sarà approvato dal COMINT);
- un Documento di visione strategica per lo Spazio 2025-2034;

e poi formalizzerà le attività di breve-medio termine nel Piano Triennale delle Attività dell'ASI che definisce gli obiettivi, i programmi di ricerca e applicativi, nonché le risorse correlate.

GLI SCENARI TECNOLOGICI

I contenuti tecnici e gli scenari tecnologici che possono realizzare la strategia nazionale qui delineata sono stati selezionati dal Gruppo di Lavoro Airi sulle tecnologie spaziali che ha realizzato questo contributo.
I 24 scenari tecnologici identificati sono raggruppati nel volume per ambiti tematici:

Scienza ed Esplorazione
Tecnologie per missioni "Drag Free"
Tecnologie per lo studio e il monitoraggio del sole
Robotica e Intelligenza Artificiale per l'Esplorazione spaziale

Protezione Assets Spaziali
Tecnologie e applicazioni per la Sicurezza nello Spazio
Tecnologie di Cybersecurity per la protezione dei sistemi spaziali
Sistemi avanzati per integrazione, rifornimento, trasporto rimozione satelliti/detriti in orbita

Sistemi e Sensori a bordo di Satelliti
Tecnologie per antenne a bordo di satelliti
Tecnologie ed applicazioni innovative per mini e micro-satelliti
Tecnologie per radar da Osservazione della Terra
Edge computing per lo Spazio
Trattamento di immagini radar e di dati/segnali basate su intelligenza artificiale

Guida e Navigazione Satellitare
Global Navigation Satellite System (GNSS)
Orologi Atomici spaziali next generation

Telecomunicazioni

Le reti di comunicazione nello spazio del futuro: protocolli (5G NR NTN) e 6G

Le tecnologie Ottico-Fotoniche

Gestione e trasmissione dati ad altissima velocita per le missioni di Osservazione della Terra

Comunicazioni Quantistiche

Propulsione e Propellenti

Tecnologie per la Propulsione spaziale

Nuovi propellenti solidi

Serbatoi e strutture di nuova generazione per lanciatori e veicoli spaziali

Trasporto Spaziale

Tecnologie per l'Accesso allo spazio

Tecnologie per il Rientro Atmosferico

Materiali e Processi

Architetture strutturali avanzate ultraleggere e adattive

Additive Manufacturing



SETTORE

SPAZIO

SCENARI TECNOLOGICI

indice - scenari tecnologici

SCIENZA ED ESPLORAZIONE

1. TECNOLOGIE PER MISSIONI "DRAG FREE" 53

2. TECNOLOGIE PER LO STUDIO E IL MONITORAGGIO DEL SOLE 59

3. ROBOTICA E INTELLIGENZA ARTIFICIALE PER L'ESPLORAZIONE SPAZIALE 65

PROTEZIONE ASSETS SPAZIALI

4. TECNOLOGIE E APPLICAZIONI PER LA SICUREZZA NELLO SPAZIO 77

5. TECNOLOGIE DI CYBERSECURITY PER LA PROTEZIONE DEI SISTEMI SPAZIALI 93

6. SISTEMI AVANZATI PER INTEGRAZIONE, RIFORNIMENTO, TRASPORTO RIMOZIONE SATELLITI/DETRITI IN ORBITA 105

SISTEMI E SENSORI A BORDO DI SATELLITI

7. TECNOLOGIE PER ANTENNE A BORDO DI SATELLITI 117

8. TECNOLOGIE ED APPLICAZIONI INNOVATIVE PER MINI E MICRO-SATELLITI 127

9. TECNOLOGIE PER RADAR DA OSSERVAZIONE DELLA TERRA 145

10. EDGE COMPUTING PER LO SPAZIO 161

11. TRATTAMENTO DI IMMAGINI RADAR E DI DATI/SEGNALI BASATE SU INTELLIGENZA ARTIFICIALE 169

GUIDA E NAVIGAZIONE SATELLITARE

12. GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS (GNSS) 183

13. OROLOGI ATOMICI SPAZIALI NEXT GENERATION 193

indice - scenari tecnologici

TELECOMUNICAZIONI

14. LE RETI DI COMUNICAZIONE NELLO SPAZIO DEL FUTURO: PROTOCOLLI 5G NR NTN E 6G 203

15. LE TECNOLOGIE OTTICO-FOTONICHE 211

16. GESTIONE E TRASMISSIONE DATI AD ALTISSIMA VELOCITÀ PER LE MISSIONI DI OSSERVAZIONE DELLA TERRA 219

17. COMUNICAZIONI QUANTISTICHE 225

PROPULSIONE E PROPELLENTI

18. TECNOLOGIE PER LA PROPULSIONE SPAZIALE 245

19. NUOVI PROPELLENTI SOLIDI 299

20. SERBATOI E STRUTTURE DI NUOVA GENERAZIONE PER LANCIATORI E VEICOLI SPAZIALI 303

TRASPORTO SPAZIALE

21. TECNOLOGIE PER L'ACCESSO ALLO SPAZIO 327

22.TECNOLOGIE PER IL RIENTRO ATMOSFERICO 343

MATERIALI E PROCESSI

23. ARCHITETTURE STRUTTURALI AVANZATE ULTRALEGGERE E ADATTIVE 379

24. ADDITIVE MANUFACTURING 391

SCIENZA ED ESPLORAZIONE

TECNOLOGIE PER MISSIONI "DRAG FREE"

Alcune tipologie di missioni spaziali richiedono la compensazione delle forze di natura non gravitazionale (altrimenti dette forze di "drag") che agiscono sul satellite per raggiungere i loro obiettivi. Esempi sono costituiti dalle missioni gravimetriche e dalle missioni di fisica fondamentale.

La ***gravimetria***, ovvero la misura del campo gravitazionale terrestre, alimenta un gran numero di applicazioni, ad esempio nei settori della:

- 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 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 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 (realizzato da Thales Alenia Space Italia per l'ESA, lanciato il 17 marzo 2009 e rientrato in atmosfera l'11 novembre 2013) e dei satelliti GRACE (frutto di collaborazione tra NASA e DLR, lanciati il 17 marzo 2002 e rimasti operativi fino ad ottobre 2017) hanno fornito rispettivamente la prima mappa globale ad alta risoluzione spaziale (100´100 km) e pre

cisione (< 1mGal[1]) del campo gravitazione terrestre, e la prima misura della sua variazione nel tempo con frequenza mensile (seppur limitata ad una risoluzione di ~500 km). Sulla scia di GRACE, è stata lanciata il 22 maggio 2018 la missione GRACE Follow-On (GFO) allo scopo di assicurare la continuità del monitoraggio delle risorse idriche terrestri contenute nei grandi ghiacciai e nel sottosuolo, con le stesse prestazioni del suo predecessore.

L'obiettivo che si prefiggono le missioni gravimetriche di prossima generazione come Next Generation Gravity Mission (NGGM, attualmente progettata da Thales Alenia Space Italia per l'ESA) è quello di migliorare ulteriormente la risoluzione spaziale (a livello di 100 km) e temporale (fino ad alcuni giorni) nella misura della variazione del campo gravitazione con alta risoluzione (con sostanziali benefici in tutti i campi di applicazione). Sia le missioni GRACE, GFO che la NGGM utilizzano una coppia di satelliti che orbitano attorno alla terra a bassa quota mantenendo una formazione lineare con distanza di circa 200 km.

Un apparto 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 o "drag" prodotta dall'atmosfera residua presente alla quota del satellite); l'effetto di queste accelerazioni deve essere rimosso dalla variazione di distanza tra i satelliti misurata da un ***interferometro laser*** per isolare l'effetto del solo campo gravitazionale terrestre. A sua volta, il raggiungimento della massima prestazione dell'accelerometro richiede la compensazione entro un certo livello delle forze non gravitazionali agenti sul satellite (ovvero la realizzazione di un satellite "drag free") mediante ***propulsori elettrici*** dotati di elevato impulso specifico (per consentire una lunga vita operativa a bassa quota con una ridotta quantità di propellente) e di ***micro-propulsori a gas freddo*** (tipicamente azoto) con risoluzione ultra-fine, entrambi in grado di modulare in modo continuo la spinta in un ampio intervallo di valori. La missione GOCE è stato il primo esempio di satellite "drag free" uni-dimensionale (ovvero

[1] *s1mGal=10-2m/s2*

dove le forze non gravitazionali erano compensate solo lungo la direzione del moto orbitale) ottenuta mediante propulsione elettrica.

Un esempio di missione scientifica orientata alla fisica fondamentale che necessita di un ambiente "drag free" è costituito da LISA (Laser Interferometer Space Antenna) in fase di studio da alcuni anni da Thales Alenia Space Italia per l'ESA. L'obiettivo di LISA è l'osservazione dallo spazio delle onde gravitazionali, previste dalla teoria della relatività generale di Einstein, mediante tre satelliti orbitanti attorno al sole in modo da mantenere una formazione a triangolo equilatero con lunghezza dei lati pari a 2,5 milioni di km. Ogni satellite contiene due masse che devono essere mantenute in condizione "drag free", ovvero libere di muoversi sotto la sola influenza del campo gravitazionale esterno, nelle direzioni dei lati del triangolo. Il passaggio dell'onda gravitazionale modifica la distanza tra le masse in un modo che dipende dal fenomeno fisico che ha prodotto l'onda, e questa variazione di distanza viene misurata da interferometri laser. Nel caso di LISA, le forze non gravitazionali da compensare sono esercitate sul satellite dalla pressione di radiazione solare, molto più tenui di quelle prodotte dall'atmosfera residua su NGGM, che possono essere quindi compensate con i soli ***micro-propulsori a gas freddo*** con risoluzione ultra-fine. Gli stessi micro-propulsori vengono inoltre utilizzati, sia su LISA che su NGGM, per mantenere il puntamento preciso dei lasci laser che realizzano l'interferometro inter-satellitare.

Motivazioni per lo sviluppo

La realizzazione di missioni gravimetriche di nuova generazione 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, etc..) 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.

La realizzazione della missione LISA permetterà di aprire una ***nuova finestra di osservazione*** dell'universo diversa da quelle fino ad ora utilizzate e basate sull'osservazione delle onde elettromagnetiche provenienti dagli astri. LISA sarà infatti il primo osservatorio spaziale di onde gravitazionali nella banda di frequenza da 0.1 mHz a 1 Hz, inaccessibile dagli osservatori terrestri e riccamente popolato di sorgenti mai analizzate fino ad ora.

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 di fisica fondamentale (ad esempio per la verifica del principio di equivalenza), interferometri ottici per osservazioni ad altissima risoluzione della Terra e dei pianeti, e applicazioni di telecomunicazione spazio-terra e spazio-spazio operanti in banda ottica.

Stato dell'arte

Grazie alla realizzazione del satellite GOCE (Figura 1), Thales Alenia Space Italia (TAS-I) 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. Inoltre, TAS-I ha partecipato a diversi progetti di definizione della ***Next Generation Gravity Mission*** (Figura 2), alla fase di progettazione della missione ***LISA*** (Figura 2) e di sviluppo di alcune delle tecnologie associate. In particolare, sono stati realizzati i ***simulatori numerici ad alta fedeltà*** delle missioni NGGM e LISA utilizzati per la definizione e validazione delle procedure e algoritmi per l'acquisizione e mantenimento dei ***collegamenti ottici inter-satellitari***, indispensabili per il funzionamento degli interferometri laser, e della ***compensazione delle forze aerodinamiche***, in collaborazione con il

Politecnico di Torino. Inoltre, in collaborazione con l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM), sono stati realizzati prototipi di un ***interferometro laser*** per la misura della distanza inter-satellitare e, in collaborazione con Thales Alenia Space Svizzera, di un ***apparato sensoriale*** per l'acquisizione il mantenimento del ***puntamento del fascio laser***.

L'industria italiana è all'avanguardia anche nel campo della micro-propulsione a gas freddo, mentre attualmente la leadership delle altre tecnologie fondamentali è detenuta da altre aziende europee:

- Accelerometri ultrasensibili (Francia)
- Propulsori elettrici a spinta variabile (UK, Germania)
- Sorgenti laser stabilizzate e interferometri a rigenerazione di potenza (Germania).

L'elettronica di controllo gli apparati sopra elencati può essere tuttavia realizzata dall'industria italiana.

Risorse economiche necessarie

Dell'ordine di alcune decine di milioni di euro (non quantificabile in modo preciso) per le tecnologie sviluppabili in Italia nel campo della micro-propulsione a gas freddo.



Figura 1: GOCE, realizzato da Thales Alenia Space 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 ***"drag free"*** di compensazione della forza aerodinamica prodotta dall'atmosfera residua mediante ***propulsore elettrico a ioni*** a spinta variabile.

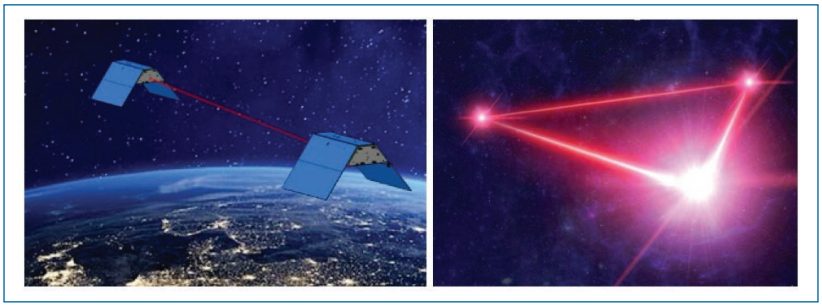


Figura 2: La missione gravimetrica ***Next Generation Gravity Mission*** progettata da TAS-I per l'ESA (a sinistra) consiste di una coppia di satelliti ***"drag free"*** (ottenuto mediante l'uso di ***propulsori elettrici e a gas freddo***) con a bordo ***accelerometri ultrasensibili*** e un ***interferometro laser*** per misurare la variazione di distanza inter-satellitare. La missione per l'osservazione delle onde gravitazionali LISA progettata da TAS-I per l'ESA (a destra) consiste di tre satelliti in formazione a triangolo equilatero, ciascuno dei quali contiene due masse mantenute in condizione "drag free" mediante ***micro-propulsori a gas freddo*** e interferometri laser inter-satellitari per misurare la variazione di distanza tra le masse.

TECNOLOGIE PER LO STUDIO E IL MONITORAGGIO DEL SOLE

Le missioni spaziali per lo studio del Sole ed il monitoraggio dell'attività solare offrono i seguenti vantaggi:

- Possibilità di 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.
- Possibilità di monitorare ininterrottamente il Sole per periodi di diversi anni con la stessa strumentazione.
- Possibilità di compiere osservazioni del Sole e misure del vento solare e del campo elettro-magnetico solare a varie distanze, in particolare più ravvicinate di quella della Terra dal Sole, e a diverse latitudini fuori dal piano dell'eclittica (piano contente l'orbita terrestre).
- Possibilità di osservare fenomeni che si manifestano sulla superficie solare durante tutto il loro ciclo evolutivo, senza che scompaiano alla vista per effetto della rotazione del Sole rispetto 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 sottofondo 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 intercetta, 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 estremamente tenue rispetto a quella proveniente dal disco solare. L'intensità della 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:

> la limitazione della luce del disco diffusa e/o diffratta all'interno dello strumento, ottenuta mediante:

- una levigatura estremamente spinta dei bordi dell'apertura dello strumento e delle superfici delle ottiche;
- un livello di pulizia particellare estremo su tutte le superfici interne del telescopio;
- 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);

> 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 (diffusa e/o diffratta) proveniente dal 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 con 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 l'attività solare 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

Le competenze europee più avanzate nel campo della ***coronografia*** solare risiedono in Italia, grazie alla presenza di un'importante comunità scientifica attiva nel campo dell'astrofisica solare e all'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) che ha investito notevoli risorse nella realizzazione dei coronografi per le missioni SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) e Solar Orbiter, entrambi effettuate sotto la guida dell'Agenzia Spaziale Europea (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 Italia) e Officine Galileo (ora

SELEX-ES) con finanziamento dell'ASI. UVCS è uno dei principali strumenti del satellite SOHO. Lanciato il 2 dicembre 1995 e tutt'ora operativo, SOHO è uno dei satelliti di cui si avvale lo Space Weather Prediction Center per il monitoraggio e la previsione degli eventi solari e geofisici.

Lo strumento ***Metis***, 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 (Figura 1). Metis è stato realizzato da Thales Alenia Space Italia (TAS-I) in collaborazione con OHB-Italia ed è stato consegnato a maggio 2017 per essere installato sul satellite Solar Orbiter, lanciato a febbraio 2020 e tutt'ora operativo. Durante la sua missione, Solar Orbiter ha portato i suoi strumenti ad osservare il Sole e l'eliosfera ad una minima distanza di 0.28 Unità Astronomiche (28% della distanza media Terra-Sole, pari a 42 milioni di chilometri). Alla minima distanza dal Sole la parte più esterna di Metis ha raggiunto temperature prossime a 400 °C, mentre i suoi sensori hanno continuato ad operare a temperature comprese tra -25 C° e -30 °C. Questa ulteriore sfida tecnologica nella realizzazione di Metis ha comportato una particolare scelta dei ***materiali strutturali*** (Figura 2) ed un sofisticato concetto di ***controllo termico*** dello strumento. Inoltre, è stato necessario proteggere l'intero satellite ed i suoi strumenti con uno speciale ***scudo termico*** (Figura 3), anch'esso concepito e realizzato da Thales Alenia Space Italia combinando materiali e rivestimenti termici resistenti ad alte temperature in un originale progetto che garantisce la dissipazione della maggior parte del flusso termico che colpisce lo scudo prima che esso raggiunga l'interno del satellite.

Sempre nell'ambito del progetto Metis, è stato realizzato ed installato presso la ditta ALTEC uno speciale apparato (OPSys - 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

Dell'ordine di alcune decine di milioni di euro (non quantificabile in modo preciso) per lo sviluppo e realizzazione di strumentazione dedicata allo studio del Sole e al monitoraggio dell'attività solare.

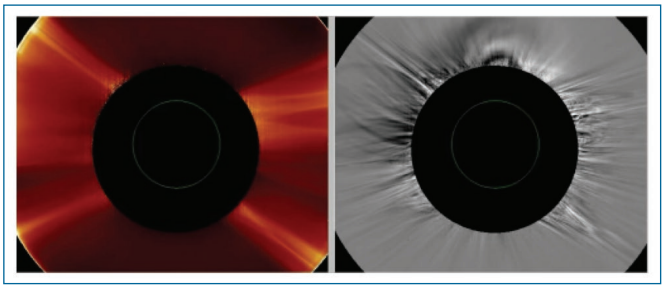


Figura 1: Immagini della corona solare riprese dallo strumento Metis solare in luce visibile polarizzata (a destra) e nella riga spettrale Lyman-α dell'idrogeno a 121.6 nm (a sinistra) quando Solar Orbiter si trovava a 0.32 Unità Astronomiche dal Sole (48 milioni di chilometri).
(Fonte: ESA&NASA Solar Orbiter/Metis Team)



Figura 2: IModello di volo del coronografo Metis, integrato da TAS-I nella Optical Payload Systems facility presso ALTEC. La struttura del coronografo, progettata da TAS-I, è realizzata in ***materiali compositi*** e titanio per garantire la necessaria stabilità dimensionale unita alla resistenza alle alte temperature.

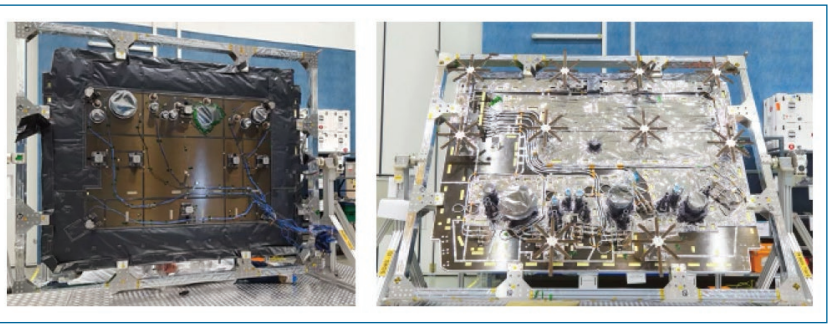


Figura 3 : Lo ***scudo termico*** realizzato da TAS-I per proteggere Solar Orbiter ed i suoi strumenti, tra cui Metis, dal flusso di radiazione termica proveniente dal Sole che alla minima distanza di 0.28 Unità Astronomiche raggiunge 17 kW/m².

ROBOTICA E INTELLIGENZA ARTIFICIALE PER L'ESPLORAZIONE SPAZIALE

L'Esplorazione e futura colonizzazione di corpi celesti, hanno indotto le maggiori agenzie spaziali a pianificare molte missioni specifiche che dipendono fortemente dall'uso di sottosistemi robotici complessi.
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 e l'Intelligenza Artificiale hanno un ruolo centrale nei programmi delle maggiori agenzie spaziali che riguardano le missioni di esplorazione spaziale e quindi sono impegnate a sostenere la relativa ricerca e sviluppo di quelle 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 e più efficientemente in scenari complessi e rischiosi quali sono quelli di Orbita Terrestre, Luna, Marte e Asteroidi.
La Robotica è una disciplina che interseca molte applicazioni. Per esempio, in ambito esplorazione planetaria possono essere individuate specifiche tecnologie Robotiche che, quando integrate insieme, consentono la realizzazione di sistemi esplorativi altamente performanti. Nello specifico, tali sue tipiche funzioni sono l'**Autonomia di Bordo**, e la capacità di **prelevare e manipolare campioni** di interesse scientifico, analizzarli "in-situ" o immagazzinarli e prepararli per un successivo "Sample Return" per mezzo di Bracci Robotici) che operano su oggetti collaborativi e non collaborativi (ad esempio per operazioni di maintenance/deorbiting/refuelling di Satelliti già in orbita). Una caratteristica di tutte queste funzioni 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 insiemi di tecnologie e laboratori di prova del sistema dedicati.

Nell'ambito dell'esplorazione spaziale è fondamentale l'applicazione della robotica ai **Sistemi Autonomi**, tra cui i **Rover.** Questi Sistemi 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 ed 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 in grado di decidere quale campione prelevare e come analizzarlo in loco.

Diventa Infine, un aspetto fondamentale è il tema dell'**Intelligenza Artificiale (IA)** che consiste nello sviluppo di tecniche/algoritmi in grado di incrementare 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 A.I. di circa 17 miliardi di dollari per i prossimi 5 anni. Tra i diversi approcci nello sviluppo di tali algoritmi, in ambito Spaziale le tecniche del Deep Learning sono particolarmente promettenti. Una rete Deep Learning 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 spaziale, dove si prevede l'impiego di sistemi robotici sia autonomi che a supporto della presenza umana.

L'Intelligenza Artificiale è un tema storicamente e scientificamente ricchissimo, che si rifà ad una intima ispirazione dell'uomo: ricreare in una 'macchina' le capacità cognitive e di scelta degli umani. Ovviamente la strada per arrivarci è lunga e tortuosa, ma tutti gli obiettivi tecnologici raggiunti sono stati un sogno prima di diventare realtà comune.

L'intelligenza artificiale sta crescendo qui sulla Terra, semplificando la nostra vita, ma ha senso parlare di intelligenza artificiale per applicazioni oltre i confini terrestri? Possiamo usare l'intelligenza artificiale per missioni/esplorazione spaziale? La risposta è sì, e i maggiori player internazionali, sia industriali che di ricerca – come **Thales Alenia Space in Italia** e l'Istituto Italiano di Tecnologia – si stanno già muovendo sui seguenti argomenti:

- IA asservita al riconoscimento, manipolazione e stima posa di oggetti
- Predizione guasti e auto-tuning di modelli digitali complessi

- Autonomia operativa e decisionale, come l'identificazione del percorso più idoneo tra due punti prestabiliti
- Modelli linguistici che mirino ad interazione uomo-robot efficace
- Estrazione e gestione di informazioni in maniera automatica a partire dall'enorme mole di telemetria ingegneristica e scientifica prodotta da satelliti

STATO DELL'ARTE

L'esplorazione della Luna da parte di sistemi robotizzati risale agli anni '60 ed è sempre stata monopolio di UnioneSovietica/Russia e Stati Uniti. In questi ultimi anni, dopo un lungo periodo di relativo interesse, l'attenzione per missioni lunari è tornata a crescere andando a coinvolgere numerose nazioni, ben oltre l'appannaggio di Stati Uniti e Russia. L'esplorazione Lunare ha infatti raggiunto una fase di maturazione tale per cui i primi attori privati, e sempre più attori pubblici, raggiungeranno la superficie e testeranno tecnologie a supporto di missioni di lunga durata. Solo per citare alcuni esempi, proprio durante la stesura di questo documento, l'azienda giapponese *ispace*[1] ha tentato l'atterraggio di *HAKUTO-R*, il primo lander privato lunare, trasportando anche *Rashid*[2], il primo rover commerciale finanziato dagli Emirati Arabi Uniti.

Un altro esempio giunge dalla collaborazione fra *NASA, Nokia, Intuitive Machines e Lunar Outpost* per il lancio di un *rover*[3] al fine di testare sistemi di comunicazione LTE/4G al polo sud Lunare; in questo caso, NASA riveste il ruolo di investitore e partner pubblico della Public-Private-Partnership tramite lo schema "*Public-Private Partnerships to Advance Tipping Point Technologies*"[4], Nokia è fornitrice della tecnologia di comunicazione, Intuitive Machines è costruttrice ed operatrice del lander, ed infine Lunar Outpost fornisce il rover.

Nell'ottica di agende pubbliche e private, gli sforzi esplorativi Lunari sono sempre più focalizzati sulla caratterizzazione delle risorse naturali, l'identificazione di depositi di acqua al polo sud e la ricerca del modus operandi necessario per stabilire e sostenere un accampamento lunare atto alla ricerca scientifica, l'estrazione e la lavorazione di risorse.

[1] *HAKUTO-R Mission 1 (iSpace), https://ispace-inc.com/m1*

[2] *Emirates Lunar Mission (MBRSC), https://www.mbrsc.ae/service/emirates-lunar-mission*

[3] *Nokia and Intuitive Machines Select Lunar Outpost for First Rover Mission at Lunar South Pole", https://lunaroutpost.com/nokia-and-intuitive-machines-select-lunar-outpost-for-first-rover-mission-at-lunar-south-pole/*

[4] *Space Tech Industry Partnerships (NASA), https://www.nasa.gov/directorates/spacetech/solicitations/tipping_points*

Non a caso, la maggior parte delle prossime missioni esplorative nate in seno ad agenzie nazionali prevedono l'utilizzo di piattaforme mobili dotate di strumenti di analisi, estrazione e movimentazione della regolite lunare, oltre che di payloads atti alla produzione di energia. Alcune di queste missioni sono per esempio il rover NASA *VIPER* [5], la missione dell'Agenzia Spaziale Indiana ISRO *Chandrayaan*-3[6], la missione dell'Agenzia Spaziale Cinese CNSA *Chang'e 6*[7] e l'iniziativa LEAP (Lunar Exploration Accelerator Program) dell'Agenzia Spaziale Canadese CSA[8].

Studi di mercato quali il **Lunar Market Assesment di PwC** (2021)[9], la **Moon Market** Analysis di **Northern Sky Research** (2022)[10], documenti di direzione strategica quali il **Terrae Novae di ESA**[11], il **Chinese Lunar Exploration Program**[12], gli accordi **NASA Artemis**[13] e soprattutto il **Lunar Surface Exploration Scenario** dell'**International Space Exploration Coordination Group** (ISECG)[14] suggeriscono che la crescente esplorazione Lunare sia divisibile in tre fasi:

1. Fase 1 (2020-2028): fase di scouting di risorse, identificazione delle zone di interesse per future basi robotiche ed umane, consolidamento degli accordi commerciali per l'abilitazione del trasporto Terra-Luna come il CLPS[15], creazione di infrastrutture satellitari di comunicazione e posizionamento come il LCRNS[16], costruzione ed utilizzo del Lunar Gateway[17].
2. Fase 2 (2028-2035): consolidamento delle partnerships pubbliche-private per lo sviluppo della backbone dell'economia lunare, ovvero raffinamento dei

[5] *Volatiles Investigating Polar Exploration Rover (NASA), https://www.nasa.gov/viper*

[6] *Chandrayaan-3 (ISRO) https://www.isro.gov.in/chandrayaan3_science.html*

[7] *"China's Chang'e 6 mission will collect lunar samples from the far side of the moon by 2024", https://www.space.com/china-chang-e-6-moon-sample-return-preparations*

[8] *Lunar Exploration Accelerator Program (Canada) https://www.asc-csa.gc.ca/eng/funding-programs/programs/leap*

[9] *Lunar market assessment: market trends and challenges in the development of a lunar economy (PwC), https://www.pwc.com.au/industry/space-industry/lunar-market-assessment-2021.pdf*

[10] *Lunar Markets, 3rd Edition (Northern Sky Research), https://www.nsr.com/?research=moon-market-analysis-2nd-edition*

[11] *Terrae Novae 2030 Strategy Roadmap (ESA), https://esamultimedia.esa.int/docs/HRE/Terrae_Novae_2030+strategy_roadmap.pdf*

[12] *"China's Planning for Deep Space Exploration and Lunar Exploration before 2030", http://dx.doi.org/10.11728/cjss2018.05.591*

[13] *"Artemis (NASA), https://www.nasa.gov/specials/artemis*

[14] *"Global Exploration Roadmap Supplement 2020" (ISECG),https://www.globalspaceexploration.org/wp-content/uploads/2020/08/GER_2020_supplement.pdf*

[15] *Commercial Lunar Payload Services (NASA), https://www.nasa.gov/content/commercial-lunar-payload-services-overview*

[16] *Lunar Communications Relay and Navigation Systems (NASA), https://esc.gsfc.nasa.gov/projects/LCRNS*

[17] *Lunar Gateway (NASA), https://www.nasa.gov/gateway*

processi di estrazione e lavorazione delle risorse lunari (regolite, acqua, elio, etc.), oltre che prime missioni umane di lunga durata tramite habitat mobili.

3. Fase 3 (2035+): consolidamento delle economie di scala basate sull'estrazione di risorse, processamento, utilizzo in loco per la costruzione di infrastrutture e/o invio verso le Terra. Presenza umana stabile.

In sintesi, ognuna di queste tre fasi richiede l'impiego di mezzi di movimento, sia robotici e autonomi che operabili da astronauti, con differenti requisiti di locomozione a seconda dello scenario di riferimento.

Marte è la frontiera dell'esplorazione robotica: L'ultimo **Rover Autonomo** atterrato su Marte è **Perseverance**, progetto NASA (USA), che insieme ai precedenti Rover **Curiosity, Spirit & Opportunity** (Mars Exploration Rovers), è stato 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, il lander **Beagle2** sviluppato in UK è stato l'unico tentativo di inviare un'apparecchiatura automatizzata per l'esplorazione di Marte, tentativo riuscito solo parzialmente a causa del malfunzionamento del lander una volta raggiunta la superfice di Marte.

Attualmente il progetto **ExoMars** rappresenta in larga parte lo stato dell'arte europeo dell'esplorazione di Marte con il **primo lancio** effettuato nel 2016. A causa di problemi tecnici, non prevedibili durante la fase di progettazione, solo parte degli obiettivi prefissati sono stati raggiunti dalla missione.

Un **secondo lancio** prevede di portare un 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: italiano è il Prime Contractor di ESA (**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 di Autonomia associate del Rover di ExoMars sono stati sviluppati in UK e in **Thales Alenia Space in Italia**.

In questo scenario l'**Istituto Italiano di Tecnologia** ha sviluppato un legged robot come soluzione complementare ai rover basati su ruote attualmente utilizzati per esplorazioni spaziali. Attraverso il supporto dell'Agenzia Spaziale Italiana, ed insieme a **Thales Alenia Spazio in Italia e Leonardo S.p.A.**, si punta ad una completa spazializzazione del robot per una sua futura applicazione spaziale.



Figura 1 : Exomars Rover (Fonte: ESA e Thales Alenia Space in Italia)

Per quanto riguarda la **Manipolazione in ambiente spaziale**, le applicazioni più mature sono quelle legate alla International Space Station (già equipaggiata con i bracci robotici "Canadarm" realizzato in Canada, ed "ERA", il risultato di una collaborazione tra Europa e Russia). Molti studi e prototipi di bracci robotici/manipolatori sono stati realizzati/in via di realizzazione per le applicazioni più "futuristiche", come ad esempio maintenance/deorbiting/refuelling di satelliti collaborativi/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

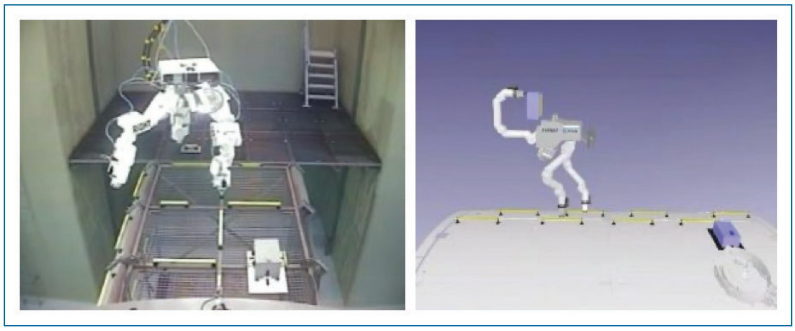


Figura 2 : Eurobot WET Model (Fonte: ESA e Thales Alenia Space in Italia)

esterna di un satellite/Stazione spaziale per effettuare operazioni di maintenance. 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 esempio: DELIAN, di 1 metro di estensione con 6 giunti ed una elevata accuratezza di posizionamento), sia in supporto alle operazioni extra-veicolari effettuate dagli astronauti, per esempio sulla ISS come DEXARM, braccio robotico modulare composto da 7 giunti. Attualmente Leonardo S.p.A. è alla guida di un consorzio Europeo per progettare e realizzare il braccio robotico a 7 gradi di libertà STA – Sample Transfer Arm per la missione congiunta NASA-ESA MSR Mars Sample Return. I bracci robotici sviluppati per esplorazione planetaria sono utilizzabili anche per la manutenzione di sistemi, inclusi i satelliti, come spiegato in questo volume nella tecnologia "Sistemi avanzati per integrazione, rifornimento, trasporto e rimozione satelliti/detriti in orbita".

In questo scenario cade anche l'attività congiunta tra l'**Istituto Italiano di Tecnologia** e l'Agenzia Spaziale Italiana per la realizzazione di un braccio robotico soft e self-healing che possa operare grasper tra satelliti o come futura soluzione in seno alla Stazione Spaziale Internazionale.

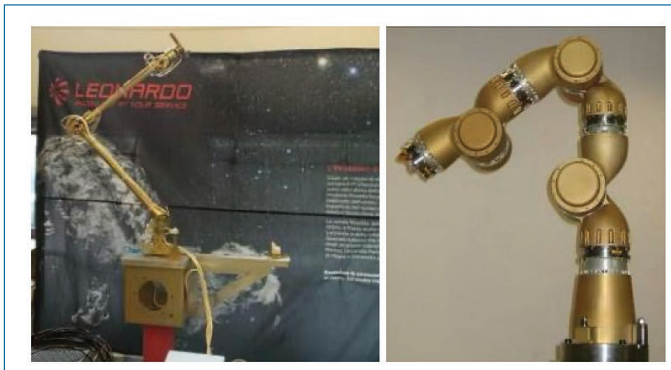


Figura 3 : Robotic Arms: DELIAN and DEXARM (Fonte: ESA e Leonardo)

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

La maturazione fino a TRL6 (cioè dimostrazione delle funzionalità in ambiente rappresentativo) delle tecnologie chiave robotiche richiedono investimenti nell'ordine di alcuni milioni di Euro (1-5) per ogni sottosistema qualificato. Le priorità sono legate alle roadmap internazionali, che prevedono come trend dominante il ritorno sulla Luna (tramite rover) e l'In Orbit Servicing (coperto dalla tecnologia "Sistemi avanzati per integrazione, rifornimento, trasporto e rimozione satelliti/detriti in orbita"), con il potenziale utilizzo nel medio lungo termine di intelligenza artificiale. Sono quindi considerati prioritari sviluppi dei seguenti sottosistemi: avionica 'next gen' che permetta l'uso dell'AI on-board per applicazioni robotiche critiche come navigazione e autonomia, sistemi di locomozione lunare, sistemi di manipolazione e carotaggio, sistemi di guida in ambienti ombreggiati o completamenti oscuri (polo Sud lunare). Investimenti più importanti, nell'ordine delle centinaia di milioni di Euro, possono portare a dimostrazioni tecnologiche complete in orbita e sul suolo lunare.

PROTEZIONE ASSETS SPAZIALI

TECNOLOGIE E APPLICAZIONI PER LA SICUREZZA NELLO SPAZIO

Lo spazio è per definizione un ambiente molto vasto che può ospitare un gran numero di risorse create dall'uomo, ma in realtà lo spazio è un ambiente inospitale dove negli ultimi anni si sono accumulati migliaia di detriti al punto tale che la sua sostenibilità sta diventando a rischio (e questo potrebbe peggiorare nel prossimo futuro) come effetto collaterale della democratizzazione dello spazio, una cambiamento positivo in termini di opportunità per noi esseri umani ma allo stesso tempo un pericolo per tutte quelle risorse che sono e saranno lì per aiutarci (e quindi eventualmente un pericolo per noi stessi).

Allo stesso tempo, lo Spazio sta chiaramente diventando un nuovo "dominio" (come Terra, Mare, Aria, Cyber) che può essere utilizzato per avere un qualche predominio in termini di difesa e sicurezza, e quindi diventando un nuovo "scenario" di cui essere consapevoli, sia in termini di rischi che di tutele attive/passive. Non ultimo, alcuni effetti naturali dovuti al Sole, agli Asteroidi e ad altri Corpi Celesti possono influenzare "l'uso dello Spazio" come intendiamo fare.
Tutti questi aspetti e le potenziali minacce devono essere presi in considerazione insieme quando si pensa a fornire nuovi servizi per una completa *Space Awareness*.
Tre sono gli aspetti fondamentali da tenere in considerazione:

- La sicurezza dello Spazio come *Safety*
- La sicurezza dello Spazio in termini di *Security*
- Gli effetti della Meteorologia dello Spazio (*Space Weather*)

Sicurezza dello Spazio come Safety

Le orbite spaziali più importanti (Orbite terrestri basse – LEO (Low Earth Orbit), Orbite terrestri medie - MEO (Medium Earth Orbit) e Orbite geostazionarie – GEO (Geostationary Earth Orbit)) sono già oggi congestionate da una crescente popolazione di detriti spaziali, di cui fanno parte satelliti non più in operazione, corpi di razzi, stadi superiori di lanciatori, adattatori di carico utile e altri oggetti legati alle varie missioni di accesso allo Spazio, lanciati negli ultimi 60 anni e non adegua

tamente deorbitati, anche a causa della mancanza di regolamenti di rimozione dall'orbita e di pratiche standard di mitigazione dei detriti orbitali fino all'inizio degli anni 2000.

Le statistiche dell'Agenzia Spaziale Europea aggiornate a Dicembre 2023[1] dicono che:

- Il numero di lanci di razzi dall'inizio dell'era spaziale nel 1957 è di circa 6.500 (esclusi i fallimenti)
- Il numero di satelliti che questi lanci hanno collocato nell'orbita terrestre è di circa 16.990
- Il numero di questi ancora nello spazio è di circa 11.500
- Il numero di questi ancora funzionanti è di circa 9.000
- Il numero di oggetti detriti regolarmente tracciati dalle reti di sorveglianza spaziale e mantenuti nei loro cataloghi è di circa 35.150
- Numero stimato di rotture, esplosioni, collisioni o eventi anomali con conseguente frammentazione: oltre 640
- Massa totale di tutti gli oggetti spaziali nell'orbita terrestre: più di 11.500 tonnellate

Il numero di oggetti detriti stimati in orbita, sulla base di modelli statistici (MASTER-8[2]) sono:

- 36.500 oggetti detriti spaziali superiori a 10 cm
- 1.000.000 oggetti di detriti spaziali da più di 1 cm a 10 cm
- 130 milioni di oggetti detriti spaziali da più di 1 mm a 1 cm

Tuttavia, la statistica più rilevante è che solo una piccola parte della popolazione di detriti è tracciata dai moderni sensori di Space Situational Awareness e inserita in cataloghi aggiornati e disponibili per l'uso operativo. Ad oggi questo numero è intorno ai 35.000 oggetti. Ne consegue che qualsiasi missione è soggetta ad un rischio di collisioni con altri oggetti, noti e non noti.
Un numero così elevato di detriti spaziali sta aumentando la possibilità di tali collisioni nello Spazio ed impone:

[1] *https://sdup.esoc.esa.int/discosweb/statistics/*

[2] *https://sdup.esoc.esa.int/master/*

- Maggiori costi operativi e minore durata del satellite a causa delle frequenti manovre per evitare le collisioni;
- Rischio di perdere importanti risorse spaziali e servizi associati (ad esempio navigazione satellitare, connettività marittima e aerea, monitoraggio della terra) in caso di collisione;
- Rischio per gli esseri umani nello Spazio, se i detriti colpiscono e danneggiano la Stazione Spaziale Internazionale o le future Stazioni Commerciali

In questi ultimi anni (ed ancor più nel prossimo futuro) stiamo assistendo all'avvento di mega-costellazioni in LEO per le comunicazioni a banda larga, composte da centinaia o migliaia di satelliti (es. Oneweb, Starlink, Kuiper), a cui vanno aggiunte altre costellazioni di piccoli satelliti (cubesats, picosats, ecc.) con scopi differenti, dall'osservazione della Terra alla gestione via satellite delle reti *Internet of Things* (IoT).

Allo stesso tempo, la democratizzazione dello spazio sta riducendo le barriere di accesso allo spazio e numerose start-up stanno lanciando nuovi satelliti, anche questi con un budget limitato e molto spesso con ridotte se non nulle capacità di manovra.

Tutto ciò aumenterà il rischio di eventi di rottura e di collisioni in orbita tra satelliti e con altri detriti, provocandone quindi la frammentazione e creando di conseguenza così nuovi detriti. Inoltre, l'aumento del numero di satelliti attivi che operano in orbita bassa favorirà un nuovo fenomeno: i passaggi ravvicinati rischiosi avverranno sempre più spesso tra satelliti operativi, le cui manovre devono quindi essere opportunamente coordinate. Il cambiamento delle condizioni del traffico spaziale ci richiederà, pertanto, di definire strategie di coordinamento sempre più efficaci e puntuali.

Altri due fattori rilevanti che contribuiscono all'aumento della popolazione di detriti nello spazio sono le frammentazioni dovute ad una non corretta passivizzazione dei sotto-sistemi di un satellite a fine vite ed infine i test volontari di armi anti-satellite (ASAT, di cui si parlerà nella prossima sezione) che per dimostrare la capacità di distruggere un satellite dalla terra, portano ad un aumento improvviso della popolazione di detriti, a seguito della collisione volontaria.

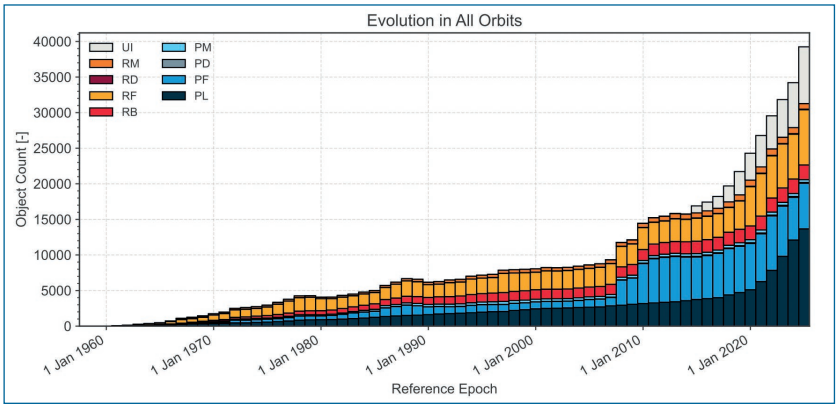


Figura 1: Evoluzione del numero degli oggetti su orbite geocentriche per classe di oggetti (carichi utili, corpi di razzi e relativi detriti)[3]

L'affollamento fisico delle orbite con satelliti e detriti può portare a una reazione a catena, nota come sindrome di Kessler[4], un fenomeno in cui la quantità di spazzatura in orbita attorno alla Terra raggiunge un punto in cui crea sempre più detriti spaziali.

Sicurezza dello Spazio come Security

Quanto più il nuovo dominio spaziale sta diventando strategico per la difesa, tanto più è conteso, con avversari che sviluppano capacità per danneggiare le risorse spaziali.

Le risorse spaziali di grande valore sono soggette a diversi tipi di minacce intenzionali da parte degli avversari:

- Fisica cinetica: attacco diretto contro un satellite o una stazione terrestre
    - Armi Antisatellite (ASAT)
    - Attacchi alle stazioni di terra;
- Fisica non cinetica: effetti fisici sui satelliti con o senza contatto (laser, microonde ad alta potenza, ecc.);
- Elettronica: interferenze con le comunicazioni da o verso i satelliti (jamming,

[3] *ESA's Space Annual Space Environment Report, March 2025*
https://www.sdo.esoc.esa.int/environment_report/Space_Environment_Report_latest.pdf

[4] *https://www.space.com/kessler-syndrome-space-debris*

spoofing, ecc.;

- Cyber: attacchi che hanno come obiettivo i dati ed i sistemi che li utilizzano, trasmettono e controllano il loro flusso;
- Satelliti di ispezione: avvicinamento ai satelliti per ottenere informazioni o dettagli sulla loro costruzione

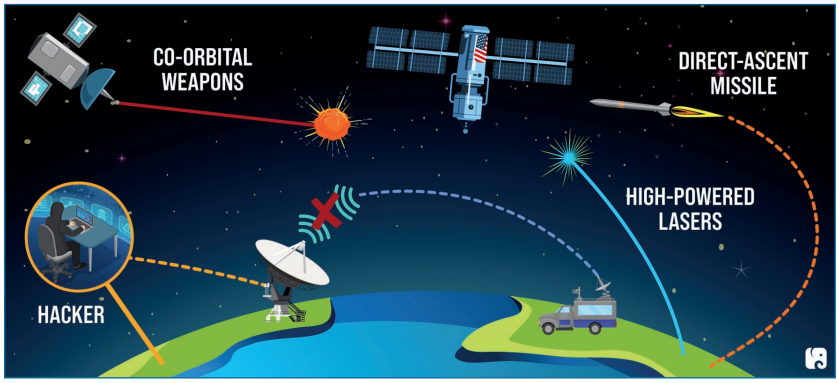


Figura 2: Differenti tipologie di minacce per gli assetti spaziali.
(Fonte: US RPC; Space Threat Assessment 2021)

In questo contesto, le contese geopolitiche si spostano direttamente nello spazio con le stesse dinamiche di quelle terrestri: esercitazioni e prove di forza per mostrare al resto dei paesi le proprie capacità militari, attività di spionaggio e contro-spionaggio di cui sono oggetto i nostri satelliti e sviluppo di capacità operative nel dominio per difendersi ed attaccare.

Fra questi eventi, abbiamo già citato gli Anti Satellite Test. L'ultimo è stato condotto dalla Russia il 15 Novembre del 2021 e la distruzione intenzionale di un satellite a fine vita (Cosmos 1408) ha portato alla creazione di migliaia di detriti, alcuni dei quali hanno minacciato anche la Stazione Spaziale Internazionale. Un altro caso eclatante è stato quando il satellite russo Luch (Olymp) – probabilmente con capacità SIGINT – si è avvicinato a soli pochi chilometri da diversi satelliti commerciali ed anche dal satellite istituzionale Athena Fidus. L'evento è stato pubbli

camente denunciato dal ministro della difesa francese Florence Parly. Infine, più recentemente l'esercito di liberazione popolare cinese ha dimostrato di avere capacità di docking fra satelliti e poter eseguire manovre ad altissima dinamica che sono difficilmente rilevabili dalle moderni reti di sorveglianza, composte da telescopi e radar a terra.

Meteorologia dello Spazio (Space Weather)

Nell'agosto del 1972, una serie di potenti tempeste solari, inclusi significativi eventi di particelle solari, causarono diffusi disagi ai satelliti e ai sistemi di comunicazione terrestri sulla Terra. Le tempeste hanno avuto luogo tra le missioni lunari Apollo 16 e Apollo 17 della NASA.

Fortunatamente, all'epoca non c'erano esploratori umani al di fuori del campo magnetico protettivo della Terra. Se gli astronauti avessero incontrato queste tempeste, le dosi di radiazioni erogate avrebbero causato un avvelenamento da radiazioni se non essere letali in caso di attività extraveicolari in corso.

Quanto sopra dice semplicemente che la meteorologia spaziale è un aspetto da tenere d'occhio nelle attività spaziali, sia con equipaggio che senza equipaggio, e che le mutevoli condizioni dei sistemi solari, compresi i venti solari, hanno impatti sulle risorse spaziali e sui servizi associati, nonché sullo spazio futuro. attività di colonizzazione.

Alcuni esempi di effetti non desiderati:

- Disturbi sulle comunicazioni radio (HF; VHF e UHF)
- Disturbi sui servizi di comunicazione satellitare
- Effetto delle radiazioni sull'equipaggio dei voli ad alta quota/alta latitudine

Interferenza radar

- Effetto sulla ionosfera e impatto sui servizi di navigazione
- Impatto sull'elettronica di bordo dei satelliti

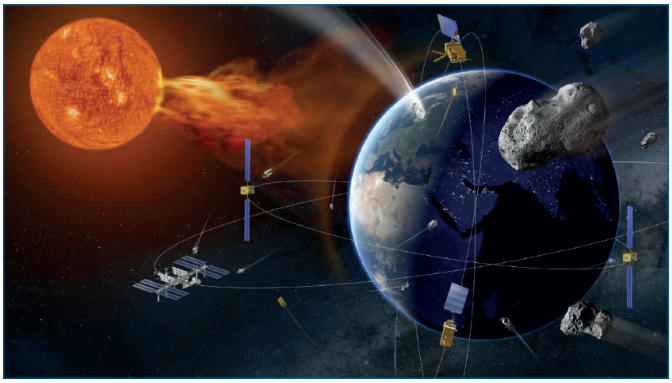


Figura 3: Impatti delle attività solari sugli assetti spaziali. (Fonte: ESA)

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

È quindi evidente come sia necessario dotarsi di sistemi integrati a supporto della sicurezza dello Spazio, che passa per un insieme di strumenti, tecnologie ed applicazioni al fine di fornire una vista completa e coerente del dominio Spazio, la cosiddetta *Space Domain Awareness* (SDA).

La SDA può essere definita come un insieme di attività volte al controllo dell'ambiente spaziale, compreso il monitoraggio dei fenomeni naturali (attività solari e asteroidi vicini alla Terra) e il tracciamento di artefatti (milioni di detriti e oggetti non controllati/cooperativi risorse spaziali).

I servizi ad essa correlati possono supportare l'ottenimento di una *Recognized Space Picture* (RSP) completa come rappresentazione in tempo reale dello Spazio in termini di informazioni relative agli asset da monitorare, con caratteristiche specializzate e capacità analitiche per differenti misurazioni, rapporti e grafici.

I principali componenti della SDA sono:

- Space Surveillance and Tracking (SST): strato informativo comune per determinare le orbite degli oggetti orbitanti (Resident Space Object - RSO) a partire

dai dati grezzi dei sensori. Queste informazioni sono solitamente raccolte in un catalogo ed aggiornate nel tempo;

- Space Traffic Management (STM): attività mirate ad evitare collisioni tra satelliti e detriti, tutelando così la sostenibilità dello Spazio;
- Space Intelligence (SI), per la protezione degli asset critici, che forniscono servizi essenziali alla nostra società;
- Space Weather (SWx): rilevamento, previsione e valutazione dei danni dei fenomeni naturali solari e meteorologici

Le ultime tre funzioni costituiscono lo strato informativo a valore aggiunto e contribuiscono alla RSP.

La gestione del traffico spaziale (STM) mira a migliorare la sicurezza delle operazioni in orbita riducendo il rischio di collisioni e interferenze. L'obiettivo dello STM è garantire la sostenibilità a lungo termine delle attività spaziali mitigando gli effetti negativi sull'ambiente spaziale.

Tre sono le funzioni principali dello STM:

- Monitoraggio del traffico spaziale
- Regolazione del traffico spaziale
- Coordinamento del traffico spaziale

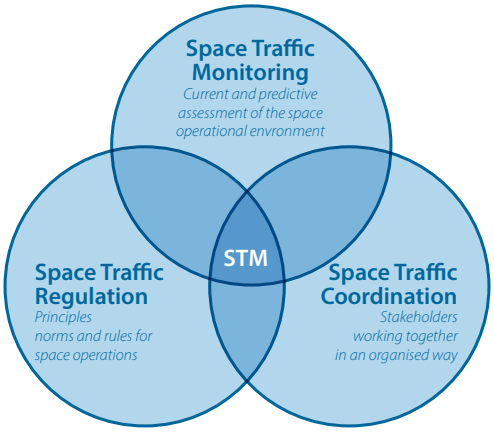


Figura 4: Funzioni principali di uno STM.
(Fonte: Towards a European Approach to Space Traffic Management, ESPI)

Nell'ambito di tali funzioni possono essere previsti i seguenti principali servizi:

- Servizi di base, quali Congiunzione, Separazione e Rientro tra/di oggetti nello Spazio
- Servizi anticollisione: supporto all'utente (ovvero operatore satellitare) nella pianificazione delle manovre anticollisione e nel monitoraggio della congiunzione fino al momento dell'avvicinamento massimo (*Time of Closest Approach* - TCA)
- Supporto al lancio: supporto all'utente (ovvero l'operatore satellitare) nella pianificazione e nell'esecuzione delle operazioni di lancio e della fase iniziale dell'orbita (LEOP)
- *End-Of-Life* e *Deorbit*: supporto all'utente (ovvero l'operatore satellitare) nella pianificazione ed esecuzione delle operazioni di fine vita e di smaltimento del satellite in orbita

I servizi di *Space Intelligence* (SI) sono soluzioni a maggior valore aggiunto volte a raccogliere informazioni di intelligence nello Spazio per supportare la creazione di una RSP.

I principali servizi possono essere i seguenti:

- *Pattern of Life:* caratterizzazione dinamica a lungo termine di un RSO (ossia un oggetto presente nella porzione di Spazio monitorata) dal lancio alla deorbitazione
- *Spawning:* rilevamento di nuovi oggetti rilasciati intenzionalmente da un RSO
- Tracciamento degli oggetti: tenere traccia della storia di un RSO e delle informazioni correlate, inclusa la sua caratterizzazione dinamica a breve e medio termine
- Caratterizzazione della natura fisica/comportamento del RSO, mediante misure raccolte da diversi sensori (ad esempio "firme" ottiche ed in radio frequenza)
- Rilevamento di anomalie: identificazione di anomalie nel comportamento di un oggetto tracciato (ad esempio manovre inaspettate), in particolare la caratterizzazione delle capacità e intenzioni degli oggetti spaziali avversari e rilevamento tempestivo di minacce ostili ai satelliti

Per quanto riguarda invece i servizi di Meteorologia Spaziale (SWx), questi mirano a monitorare, prevedere e mitigare gli impatti delle condizioni extra-atmosferiche su risorse e servizi satellitari. Le informazioni possono essere integrate nella RSP come minacce naturali, che colpiscono il dominio spaziale.

I servizi previsti sono focalizzati su:

- Effetti sui satelliti in termini di trascinamento rispetto all'orbita nominale: miglioramenti del fattore termosferico volti a potenziare la previsione dell'orbita a supporto del calcolo del rientro, del mantenimento della traccia al suolo e delle missioni scientifiche geodetiche
- Impatti sul *Global Navigation Satellite System* (GNSS): monitoraggio dell'impatto della meteorologia spaziale sulle prestazioni del segnale GNSS, applicando la correzione del segnale per migliorarlo
- Impatti sulle comunicazioni satellitari: servizi di supporto decisionale volti a proteggere le telecomunicazioni satellitari e identificare alternative adeguate, poiché i lampi radio solari e le fluttuazioni ionosferiche generano interferenze radio su molte bande, che vanno da HF a SHF.
- Impatti sull'elettronica di bordo dei satelliti e degli assetti spaziali in generale: servizi di supporto alle decisioni volti a proteggere gli assetti satellitari durante la vita nominale (ad esempio per malfunzionamenti dovuti a carica superficiale e scarica interna, perdita dell'orientamento dovuto a malfunzionamento del sistema di puntamento, effetti di singoli eventi (*Upset; Latchup; Burnout; Functional Interrupt*), eccessivo invecchiamento dei pannelli solari).

Allo scopo quindi di avere dei sistemi integrati a supporto della sicurezza dello Spazio, l'approccio ideale è quello di avere un unico ambiente in cui tutti e tre i pilastri sopra descritti sono rappresentati e le informazioni sono rapidamente disponibili agli utenti e/o agli operatori. Osservando la Figura 5 qui di seguito, da sinistra a destra i prodotti ad alto valore aggiunto sono estratti da informazioni di base come osservazioni e cataloghi. Inizialmente si dispone dell'elaborazione di base che determina i servizi principali relativi allo *Space Surveillance and Tracking* (SST) e, se combinata con norme, standard e regolamenti, consente lo sviluppo

di servizi di gestione del traffico spaziale (STM). Tali informazioni possono essere integrate con informazioni sulla meteorologia spaziale per migliorare la determinazione e la propagazione dell'orbita, oltre a fornire una panoramica integrata sull'impatto dei fenomeni meteorologici spaziali. Infine, è possibile estrarre dall'insieme dei dati disponibili ulteriori informazioni per passare dal dominio della sostenibilità dello Spazio a quello dell'Intelligence. Qui troviamo i servizi a maggior valore aggiunto che permettono infine di avere una RSP come illustrata in precedenza.

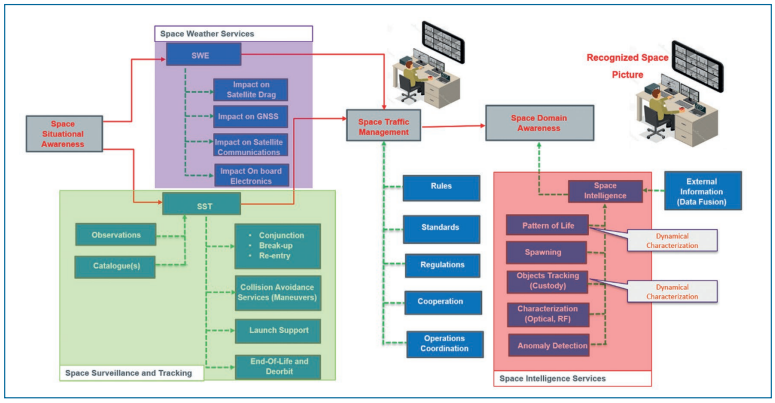


Figura 5: Approccio integrato ai servizi di SDA

STATO DELL'ARTE

L'Italia partecipa alla Partnership EU SST – E*uropean Union Space Surveillance and Tracking*.

Lo Space Surveillance and Tracking Support Framework è stato istituito dall'Unione Europea nel 2014 con la Decisione 541/2014/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio. Tale Decisione prevedeva la creazione di un Consorzio SST composto inizialmente da cinque Stati membri dell'UE – Francia, Germania, Italia, Spagna e Regno Unito – e poi da otto con l'aggiunta di Polonia, Portogallo e Romania nel 2018, successivamente ridotto a sette con la rimozione del Regno Unito a seguito del processo di Brexit. Negli anni si sono uniti altri paesi ed il consorzio è evoluto verso una partnership, finanziata anche con budget proveniente dallo space program dell'Unione Europea.

Il sistema è gestito in maniera federata. Ciascuno Stato Membro all'interno del consorzio EU SST utilizza il proprio sistema SST nazionale (sensori e infrastruttura di elaborazione), con capacità diverse.

L'Italia in questo consorzio è titolare dei servizi di *Re-entry e Fragmentation* e contribuisce con alcuni sensori laser, ottici e radar posti sul territorio nazionale. Le attività sono coordinate dal Centro SSA della Difesa, sito a Poggio Renatico (FE). Qui si raccolgono i dati dei sensori nazionali, si elaborano i servizi di cui l'Italia è responsabile e si interfaccia il centro EU-SST (recentemente passato dalla gestione del SatCen - European Union Satellite Centre ad EUSPA).
Il sistema è suddiviso in tre funzioni principali:

- La funzione *Sensor,* costituita da una rete di sensori per rilevare e tracciare oggetti spaziali in tutti i regimi orbitali (LEO, MEO, HEO e GEO)
- La funzione *Processing*, che mira a coordinare tra i Centri Operativi nazionali la condivisione dei dati, l'elaborazione e l'analisi dei dati condivisi per generare il database EU SST
- La funzione *Service Provision*, incaricata di fornire tre servizi SST: *Collision Avoidance* (CA), ***Re-entry Analysis*** (RE) e *Fragmentation Analysis* (FG)

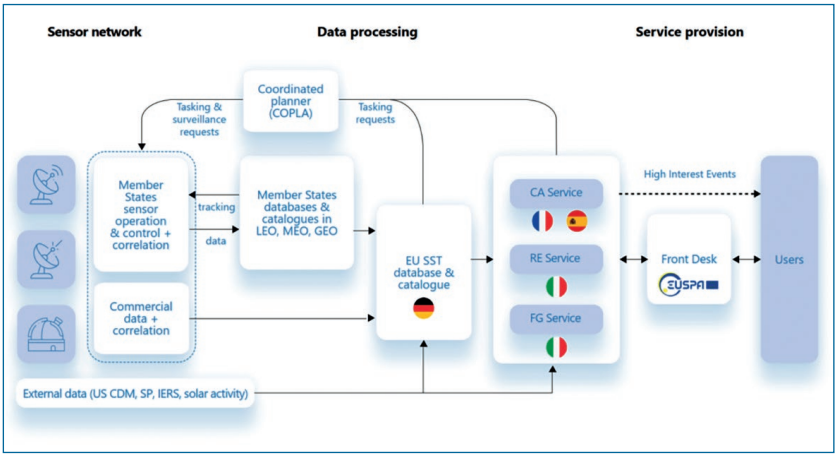


Figura 6: Architettura del Sistema EU SST. (Fonte: EU SST)

I tre servizi SST sopra elencati possono essere brevemente descritti come segue:

> Collision Avoidance:

- Fornisce una valutazione del rischio di collisione tra veicoli spaziali o tra veicoli spaziali e detriti spaziali e genera avvisi per evitare collisioni
- Analizza tutte le informazioni disponibili al fine di individuare approcci ravvicinati con diversi livelli di rischio

> Re-entry Analysis:

- Fornisce una valutazione del rischio derivante dal rientro incontrollato di artefatti spaziali nell'atmosfera terrestre e genera informazioni correlate
- Analizza tutte le informazioni disponibili relative ai rientri incontrollati entro 30 giorni

> Fragmentation Analysis:

- Fornisce il rilevamento e la caratterizzazione di frammentazioni, rotture o collisioni in orbita
- Analizza tutte le informazioni disponibili (a breve, medio e lungo termine) riguardanti l'oggetto/i coinvolto/i nell'evento

L'evoluzione in una Partnership ha migliorato le capacità finanziarie del programma e consente lo sviluppo di nuovi servizi per supportare le manovre di prevenzione delle collisioni, rilevare ed evitare interferenze e supportare le future operazioni dei servizi in orbita.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

Nonostante gli sforzi fatti dall'Unione Europea per aumentare la dotazione economica del programma EU-SST, il budget allocato è ancora lontano da quello che sarebbe necessario per soddisfare il livello d'ambizione dichiarato e per porsi allo stesso livello delle altre potenze mondiali (USA, Russia, Cina e India) che investono miliardi in questo settore.

In particolare, è auspicabile muoversi secondo le seguenti direttrici:

- La creazione di un programma flaghsip europeo per SSA/STM volto ad aumentare la disponibilità e la qualità di sensori in modo tale da garantire autonomia

strategica all'Unione che oggi è ancora dipendente dagli USA. Qualche passo avanti è stato fatto ventilando l'ipotesi di hosted payload SSA su costellazioni da targa europea, ma è necessario aumentare il livello di ambizione e promuovere un sistema space-based europeo che fornisca dati con più alta rivisita e copertura, rispetto ai sensori terrestri

- La creazione di un framework normativo che regoli le attività nello spazio ed al tempo stesso non sia eccessivamente vincolante per gli attori della Space Economy. In tal senso, l'Europa sta promuovendo una Space Law che possa essere accettata da tutti gli stati membri e accordarsi su base bilaterale con quella delle altre spacefairing nations

Stimolare il contributo di grandi aziende e start-up in ambito SSA, puntando all'interoperabilità fra sistemi e favorendo il contributo industriale all'interno della partnership EU-SST

- La creazione di un framework di condivisione dati normato, con un duplice scopo. Da una parte, la promozione della standardizzazione in tutti i servizi e processi coinvolti, al fine di favorire l'interoperabilità e la sostenibilità di iniziative comuni, nazionali ed internazionali. Dall'altra, il supporto alla creazione di dataset completi ed estensivi da sfruttare in ambito data science per lo sviluppo di tecnologie innovative basate sull'intelligenza artificiale.
- L'introduzione di un ponderato livello di autonomia nei servizi della SDA e nei processi decisionali. Con il crescente numero di satelliti, l'automazione di parte delle operazioni è imminente, sia per le interessanti evoluzioni tecnologiche che può offrire nell'erogazione di servizi, sia per la crescente complessità nella gestione di un numero elevato di satelliti, mantenendo comunque gli operatori coinvolti nei processi decisionali. Tuttavia, l'automazione deve essere implementata garantendo sempre la sicurezza dei sistemi satellitari. Solo in questo modo potremo sfruttarne appieno i numerosi vantaggi, integrando l'automazione delle operazioni e dei processi decisionali nella gestione del traffico spaziale.
- L'espansione delle capacità di sorveglianza spaziale verso nuovi domini strategici, quale l'ambiente cislunare. Lo spazio cislunare sta assumendo un'importanza crescente nei programmi spaziali internazionali, ma la consapevolezza della situa-

zione in questo dominio rimane limitata. Di conseguenza, le missioni in orbita cislunare operano con margini di sicurezza ridotti. Per colmare queste lacune, è già in corso uno sforzo internazionale volto a potenziare le capacità di monitoraggio oltre l'orbita geostazionaria, migliorando sia l'infrastruttura di sensori sia i processi di elaborazione e interpretazione dei dati.

TECNOLOGIE DI CYBERSECURITY PER LA PROTEZIONE DEI SISTEMI SPAZIALI

Nella progettazione e sviluppo di sistemi satellitari destinati alle varie tipologie di missione, come l'Osservazione della Terra, la Navigazione e le Telecomunicazioni, il tema *Cybersecurity* è divenuto un elemento tecnologico imprescindibile per garantire l'affidabilità e la resilienza dei sistemi satellitari stessi. Questo tipo di tecnologia richiede una crescente conoscenza tecnica specifica dello stato dell'arte e delle metodologie in materia di protezione da attacchi *Cyber* (analisi automatica delle minacce, algoritmi matematici di crittografia, ecc.) e il suo utilizzo è sempre più diffuso in tutti i sistemi complessi che richiedono la gestione e lo scambio di informazioni. L'obiettivo finale è quello di assicurare continuità ai servizi richiesti dall'utente e di preservare l'integrità delle informazioni e dei dati generati dai sistemi satellitari (come, ad esempio, le immagini radar in un sistema di osservazione della Terra) e dei dati riguardanti il controllo e monitoraggio dei satelliti in orbita.

Per raggiungere tali obiettivi è quindi indispensabile acquisire e sviluppare tecniche avanzate ed algoritmi di *Cybersecurity* per la protezione dei sistemi spaziali, in grado di garantire un livello adeguato di sicurezza rispetto alle possibili minacce esterne. La sicurezza dei dati è un elemento chiave nei sistemi spaziali e riguarda sia il Segmento Spaziale sia il Segmento di Terra. Tipicamente, come mostrato schematicamente in Figura 1, l'architettura del segmento di Terra di un sistema satellitare può comprendere varie funzionalità di *Cybersecurity* 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 "Cybersecurity Awareness" da parte degli utenti che, nel dominio stesso, accedono a vario titolo alle informazioni in esso presenti.

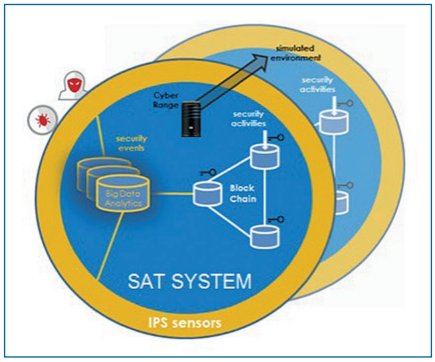


Figura 1: Schema di principio dei servizi di cybersecurity (fonte: Thales Alenia Space)

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 *Cybersecurity*, 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 (Intrusion Prevention System) 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 e 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, stazio

ni 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 i moderni 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 oppure utilizzare differenti metodi di protezione.

Attualmente le tecniche crittografiche sono basate su problemi matematici per i quali non è noto alcun algoritmo in grado di risalire alla soluzione in maniera computazionalmente efficiente (vale a dire che anche i più potenti sistemi di calcolo oggi a disposizione, necessitano di tempi dell'ordine delle migliaia di anni per violare la chiave crittografica). Tuttavia, gli sviluppi recenti nel campo della computazione quantistica potrebbero rappresentare una minaccia concreta alla inviolabilità degli algoritmi classici, impattando quindi la sicurezza di tutta la crittografia a chiave pubblica oggi in uso.

Nonostante sia ancora difficile valutare l'orizzonte temporale in cui i computer quantistici potrebbero costituire una minaccia concreta alla crittografia a chiave pubblica, è già in corso un processo di transizione - fortemente voluto dalla NSA (National Security Agency) e dal National Institute of Standards and Technology (NIST) americano - verso gli algoritmi di crittografia *quantum-restistant*. Di fatti, attualmente il rischio maggiore è relativo alle strategie del tipo "store now/decrypt later", che prevedono di intercettare e memorizzare i dati sensibili cifrati con lo scopo di utilizzare in futuro un computer quantistico per la loro decifratura, considerando che molti dati mantengo il livello di dati sensibili anche a distanza di moltissimi anni. La Post-Quantum Cryptography (PQC) si occupa del design di schemi crittografici a chiave pubblica implementabili su elaboratori classici e resistenti anche ad attacchi di tipo quantistico. Di conseguenza, le tecniche crittografiche post-quantum basano la propria sicurezza su problemi matematici per cui non sono noti algoritmi risolutivi efficienti, indipendentemente dalla loro natura classica o quantistica.

Per satelliti che fanno uso di vecchi schemi crittografici, che prima si pensavano sicuri, vengono attualmente utilizzate protezioni a livello di comunicazione, dette protezioni di layer fisico. Queste stesse misure di prevenzione sono utilizzate anche per schemi moderni per evitare che questi vengano riconosciuti. In questo contesto, la minaccia maggiore è rappresentata dall'identificazione dello schema crittografico e quindi, dal numero di informazioni, in termini di numero di tra-

smissioni, che giungono a destinazioni non autorizzate. In questo caso, i metodi utilizzati per proteggere gli asset mirano alla riduzione delle informazioni che possono essere trasmesse. Esistono principalmente due metodi che sono atti a prevenire la ricezione di informazioni:

- il primo mira a garantire una peggiore qualità della comunicazione in zone in cui non sono presenti ricevitori autorizzati, questo è possibile, ad esmpio, attraverso sistemi di Intelligent Reflecting Surfaces;
- il secondo si basa sull'utilizzo di sistemi di schemi di modulazione che prevengono la collezione e il catalogo di una grande quantità di informazioni, due esempi sono modulazioni che fanno uso di frequency hopping e tecniche di spread spectrum.

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

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. La versione più aggiornata (CFS 2.0) è stata pubblicata nel 2024, e riporta 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 spe

cifica 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. Le metodologie standard (ISO, NIST, EBIOS) rappresentano il punto di partenza per la valutazione del rischio che per il settore spaziale vanno integrate con quegli elementi che rendono più rilevante la metodologia per il contesto specifico. 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 nella 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. Nello scenario internazionale attuale, inoltre, gli aspetti di Cybersecurity rivestono un ruolo sempre più importante per le missioni civili, poiché eventuali attacchi possono avere un forte impatto sui servizi verso i cittadini, così come possono, a livello industriale, compromettere l'immagine e la credibilità dell'azienda coinvolta.

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.

SISTEMI AVANZATI PER INTEGRAZIONE, RIFORNIMENTO, TRASPORTO RIMOZIONE SATELLITI/DETRITI IN ORBITA

Attualmente, la più grande limitazione che coinvolge la quasi totalità degli asset spaziali è l'assenza di una capacità sostenibile per l'accesso dopo il lancio agli oggetti in orbita, per poter effettuare manutenzione o ridurre rischi relativi alla permanenza in orbita di materiale non attivo.

Nell'ultimo decennio diverse soluzioni sono state studiate e proposte per introdurre nel settore pubblico e privato tale capacità e in ambiti molto diversi tra loro, dall'Esplorazione Spaziale Umana del sistema solare alla regolamentazione ed ottimizzazione dell'accesso all'orbita terrestre per ragioni scientifiche, commerciali e militari. Inizia anche ad essere concreta la necessità di avere a disposizione degli elementi nuovi, modulari, provvisti di funzionalità flessibili e caratteristiche di riusabilità: **i moduli di servizio** (**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 degli Space Tug di effettuare il **rendez-vous & docking** con un secondo oggetto in orbita, cioè di avvicinarsi in modo sicuro, evitando quindi collisioni, per poter essere in grado di svolgere la missione prestabilita. A valle dell'abilità rendez-vous & docking troviamo una serie di abilitá secondarie la cui importanza sta crescendo soprattutto in previsione della costruzione di grandi infrastrutture orbitali. Nello specifico si fa riferimento alle abilità di **ispezione, manutenzione/riparazione, assemblaggio, trasferimento, e rifornimento**. L'abilità di ispezione riguarda la capacità degli Space Tug di identificare eventuali problematiche presenti in oggetti orbitali, a cui eventualmente seguiranno operazioni di manutenzione/riparazione. L'abilità di ispezione può anche permettere la realizzazione di infrastrutture, ovvero il loro assemblaggio. Non meno rilevante l'abilità di eseguire trasferimenti orbitali 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. In questo scenario cade anche l'abilità di rifornimento, che

puó consentire l'estensione della vita operativa dei satelliti. Altro modo per garantire l'estensione della vita operativa dei satelliti è quello di uno Space Tug che si possa agganciare al satellite da servire in modo da poterne prendere controllo dell'attitudine (in questi casi, si parla di missioni di AOCS Takeover) e quindi di poter permettere l'esecuzione delle operazioni normali, anche in caso il propellente risulti completamente consumato, o in caso di un malfunzionamento del sistema propulsivo o di controllo orbitale.

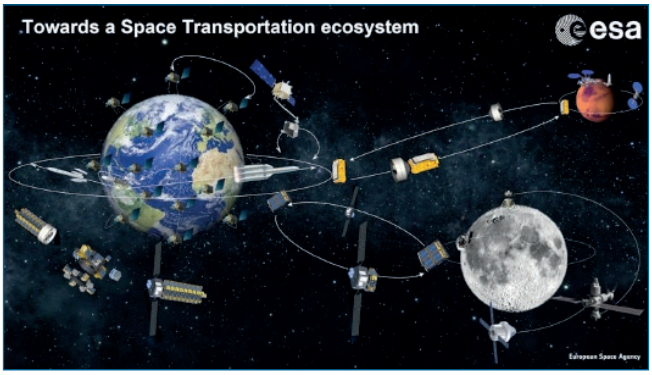


Figura 1: Esempio di ecosistema spaziale (Fonte: ESA)

Le tecnologie abilitanti che consentono il raggiungimento degli scenari sopra citati sono la robotica, la propulsione e le tecnologie di guida, navigazione e controllo per la fase di rendez-vous con l'oggetto target (detrito o satellite) e, naturalmente, la sua cattura.
La propulsione deve essere:

- a 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 stu-

dio 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, come pannelli solari di grande superficie, flessibili ed ultraleggeri e sistemi di distribuzione innovativi. Per il lungo termine e per orbite più distanti dalla terra, vengono considerati anche sistemi ad energia nucleare.

L'**attracco o la cattura** di un altro oggetto nello spazio caratterizza la maggior parte delle applicazioni degli Space Tug. Nel prossimo futuro, l'applicazione con la maggior complessità operativa 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. Accade infatti che tali oggetti non siano cooperativi, ovvero hanno caratteristiche fisiche (es. integrità delle strutture, energia residua) e dinamiche (es. rateo di rotazione) non conosciute, che complicano la fase di cattura.

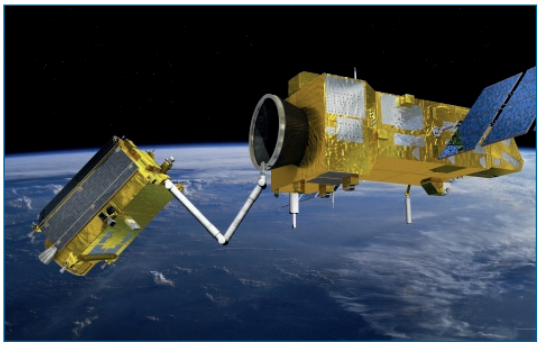


Figura 2: Esempio di cattura orbitale (Fonte: ESA e Thales Alenia Space in Italia)

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 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 qualificando due interfacce europea standard per i futuri satelliti (ASSIST con GMV, SIROM con SENER).

In uno scenario di riduzione dei costi ed ottimizzazione dell'utilizzo dei nuovi satelliti, la funzione degli Space Tug sarà anche 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 o anche la possibilità di agganciarsi solidamente agli stessi, ad esempio attraverso l'anello adattatore o altre interfacce, per poterne controllare l'attitudine e la propulsione, in caso che il completo utilizzo del carburante o un malfunzionamento

al sistema di controllo determini necessariamente la fine della missione. 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 sia 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 dimostrato da nuovi attori quali Google e SpaceX che hanno già iniziato a produrre e lanciare migliaia di satelliti per diffondere l'accesso ad Internet e realizzare una connessione su scala globale. Alcuni scenari prevedono, in pochi anni, l'aumento di satelliti in orbita a oltre 10.000 unità, principalmente in orbita bassa, aumentando la generazione di detriti e conseguente rischio di collisione. Per questa ragione la cui rimozione dei detriti dovrebbe essere considerata una priorità per permettere l'accesso e l'utilizzo dello spazio anche in futuro.

In generale, le infrastrutture spaziali sono fragili e poco resilienti. Il motivo principale è che le operazioni più semplici che rendono a terra rendono le infrastrutture più robuste, nello spazio non sono possibili. Queste operazion sono, ad esempio, la possibilità di avvicinarsi, o attraccare, a queste infrastrutture, ispezionarle, riparare o sostituire moduli, aumentarne la vita utile, spostarle o manipolarle.

Dal punto di vista nazionale, le tecnologie inerenti ai 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.

L'occasione è ghiotta perché il mercato dei servizi orbitali, e della logistica spaziale in generale, è molto grande e per molti versi ancora inesplorato, e va di pari passo con l'espansione del mercato stesso e con le ambizioni degli attori commerciali e istituzionali che vi operano. Molti analisti vedono per la logistica spaziale uno sviluppo simile a quello che ha avuto a terra la logistica in molti settori quali i trasporti aerei, marittimi e terrestri, la gestione delle risorse e dei beni.

STATO DELL'ARTE

Dopo anni di studi di fattibilità e maturazione delle tecnologie fondamentali e critiche per questo tipo di applicazioni, si stanno materiallizzando innumerevoli missioni dimostrative di in orbit servicing. Tali missioni sono principalmente

devote alla dimostrazione in orbita delle tecnologie, in modo da essere pronti a fornire dei servizi commerciali entro il 2030. Le maggiori missioni internazionali applicabili al momento della stesura di questa pubblicazione sono riassunte nelle seguenti figure.

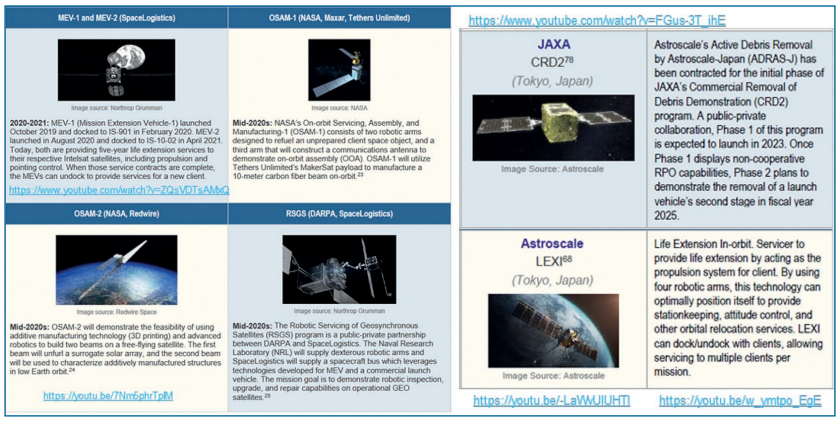


Figura 3: Missioni presenti e pianificate di In Orbit Servicing, fuori Europa



Figura 4: Missioni presenti e pianificate di In Orbit Servicing, Europa

A inizio 2023, in ambito finanziamenti PNRR gestiti dall' Agenzia Spaziale Italiana, è stato siglato il contratto per lo sviluppo di un dimostratore "full scale" che effettuerà una missione dimostrativa di In-Orbit Servicing totalmente made in Italy, frutto della collaborazione di alcuni dei principali player tecnologici italiani tra cui: **Thales Alenia Space in Italia, Leonardo, Avio, D-ORBIT, Telespazio, ALTEC e l'Istituto Italiano Tecnologia (IIT)**.

Le fasi di sviluppo del programma In Orbit Servicing saranno completate entro il 2026 (come previsto dal PNRR) ed avranno come obiettivo la progettazione e lo sviluppo di una missione dimostrativa nazionale, composta da due satelliti (un "servicer" che realizza i servizi ad un "satellite target"). Saranno progettati e sviluppati i relativi servizi di controllo e gestione a terra, che dovranno svolgere, in maniera del tutto autonoma e attraverso i necessari standard di sicurezza, una serie di operazioni in orbita quali l'ispezione, le operazioni di prossimità, l'attracco, il rifornimento, il controllo da parte del servicer del target, fino ad attività dimostrative di assemblaggio.

Sempre in Italia, D-Orbit è al comando di una cordata Europea per lo sviluppo di un servizio commerciale di estensione della utile di un satellite privato in orbita geostazionaria. Il progetto, denominato RISE, è supportato dal dipartimento di Space Safety dell'Agenzia Spaziale Europea, all'interno del programma ADRIOS, con endorsment importante dell'Agenzia Spaziale Italiana e una partecipazione ampia della filiera italiana. RISE è una missione commerciale di servizio in orbita che dimostrerà di poter raggiungere e attraccare in sicurezza a un satellite client geostazionario. Dopo aver verificato che soddisfa tutti gli standard prestazionali, D-Orbit[1] avvierà i servizi commerciali di estensione della vita destinati ai satelliti geostazionari. La missione è prevista al lancio per il 2028, ed il cliente commerciale è già stato individuato. La missione RISE dell'ESA segna un passo decisivo verso il miglioramento dei servizi e delle tecnologie in orbita, come il rifornimento, la ristrutturazione e l'assemblaggio, tutti elementi essenziali per creare un'economia circolare nello spazio.

[1] *https://www.dorbit.space/*



Figura 5: Un render dello Space Tug "GEA" di D-Orbit, che dal 2029 fornirà servizi di estensione di vita in orbita geostazionaria

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

La maturazione fino a TRL6 (cioè, dimostrazione delle funzionalità in ambiente rappresentativo) delle tecnologie chiave di In Orbit Servicing richiedono investimenti nell'ordine di alcuni milioni di Euro (1-5) per ogni sottosistema qualificato. Ad oggi investimenti importanti sono già in atto per missioni dimostrative di attracco e servizio, quindi possibili investimenti devono essere a servizio di tali missioni. In particolare, le tecnologie critiche sono relative al GNC di prossimità, Robotica di cattura e rifornimento, interfacce standard di cattura e rifornimento.

SISTEMI E SENSORI A BORDO DI SATELLITI

TECNOLOGIE PER ANTENNE A BORDO DI SATELLITI

Le antenne a bordo di satelliti si diversificano a seconda dei diversi settori applicativi con configurazione e tecnologie anche in funzione delle missioni e delle orbite considerate. Le principali applicazioni che richiedono antenne aventi specifiche caratteristiche in termini di prestazioni, frequenze di lavoro, flessibilità sono:

- Telecomunicazioni;
- Osservazione della Terra;
- Navigazione;
- Scienza (primariamente esplorazione del sistema solare, orbite aperte).

Negli ultimi 20 anni lo Spazio ha visto lo sviluppo di grandi satelliti per telecomunicazione in orbita GEO, sempre più complessi e potenti, mentre l'evoluzione dei sistemi di Osservazione della Terra ha portato allo sviluppo di satelliti principalmente in orbita LEO. A differenza delle precedenti applicazioni la Navigazione ha visto lo sviluppo di costellazioni in orbita MEO perché riescono ad ottimizzare il numero dei satelliti verso la copertura della superficie terrestre. Infine, le missioni scientifiche ha visto l'intensificarsi di missioni su Marte e su Venere ma anche verso il sole e gli estremi del sistema solare, richiedendo specifiche tecnologie per le estreme condizioni termiche che tali missioni impongono.

Più recentemente i sistemi di telecomunicazione stanno virando da missioni GEO a missioni in orbita bassa LEO per incontrare le nuove necessità di comunicazione rapida a banda larga richieste dal web e mobile richieste dai nuovi sistemi 5G e 6G. I nuovi sistemi sono quindi basati da costellazioni di centinaia / migliaia di piccoli satelliti dotati di antenne di dimensioni ridotte ma molto flessibili multifascio e multibanda e basate su Beam forming Digitali in grado di gestire contemporaneamente ed in modo indipendente decine / centinaia di fasci con elevata scansione e mobilità.

D'altra parte, mentre i primi sistemi evoluti di osservazione della Terra sviluppati in Europa erano basati si satelliti di medie dimensioni (della classe di 2-3 ton.) e grandi antenne dispiegabili, anche in questo settore le necessità di ridurre fortemente il tempo di rivisita sta portando a sviluppare costellazioni di decine di satelliti più

piccoli (classe 100-200 Kg) con antenne di dimensioni ridotte, sempre dispiegabili. In parallelo la situazione ambientale relativa all'incremento della temperatura superficiale terrestre sta portando il mondo scientifico a richiedere strumenti sempre più sofisticati (es. Radiometri) che vedono coinvolte tecnologie di grandi antenne dispiegabili a riflettore e band larghissima.
I sistemi di Navigazione stanno anche loro evolvendo dalla generazione attuale a sistemi che richiedono una maggiore flessibilità sia in termini di flessibilità che di fasci indipendenti. Di seguito si riporta un breve escursus delle tipologie di antenne sviluppate negli ultimi anni e una breve visione delle nuove applicazioni e delle relative tecnologie richieste.

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 lo stato dell'arte è di livello molto elevato con ragguardevoli progressi sviluppati nell'ultimo triennio nel settore delle antenne riconfigurabili e delle antenne attive per sistemi SAR satellitari. Aziende USA e francesi sono attive in questo campo e possiedono tecnologie parimenti avanzate.

Antenne di Telecomunicazione

Abbracciano un vasto spettro di frequenze, dalla banda U (200 MHz circa) fino alla banda Ka (30 GHz) ed oltre (banda Q/V, 40-50 GHz) diversificandosi in numerose configurazioni:

- a riflettore, a fascio singolo o multifascio;
- ad array diretto (planare o conforme),
- in configurazioni attive o semi attive ed utilizzanti diversi domini tecnologici trasversali.

I sistemi di comunicazione tipo GEO fanno ricorso a tecnologie di antenne a riflettore in materiale composito dispiegabili anche con possibilità di ripuntamento per eventuali riconfigurazioni a bordo. In Figura 1 è mostrato un esempio di antenna realizzata in composito, con superficie "shaped" per ottimizzare la copertura a Terra, alimentata da un sistema di horns in Ku in doppia polarizzazione lineare. Nella stessa figura è anche mostrato la configurazione del satellite con il doppio deployment con due riflettori sovrapposti al lancio.

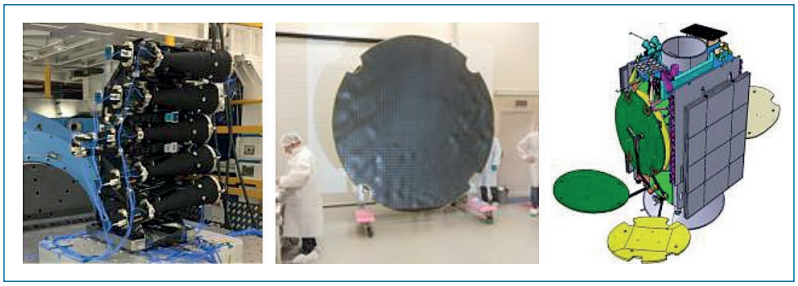


Figura 1: Esempio di antenna a Riflettore shaped in composito da 2,5 m con catena RF (TASI)

Il riflettore mostrato è in tecnologia thick shell e permette una realizzazione più semplice in quanto l'intero riflettore è realizzato da un sandwich con pelli in fibra di carbonio ed honeycomb in alluminio con spessore di circa 2 cm, che presenta ottime prestazioni di stabilità adatte ad applicazioni fino alla Ku e con diametri di 2,5-2,6 m. Passando ad antenne in Ka di dimensioni fino ai 3 m ed oltre è necessario aumentare la stabilità dimensione dell'antenna verso il range operativo che tipicamente va dai -150° C ai + 150° C per satelliti GEO. Un esempio di questa tecnologia è il riflettore in thin shell di Figura 2. In questo caso il riflettore è realizzato con un sandwich di fibre di carbonio ed un honeycomb sottile (alcuni mm) ad alta stabilità. In questo caso è necessara però una struttura posteriore di rinforzo per incontrare i requisiti meccanici richiesti al lancio.



Figura 2: Tecnologia thin shell per riflettori solidi fino a 3 m di diametro (TASI)

I sistemi attuali di comunicazione da GEO per grosse quantità di dati (VHTS Very High Throughtput Satellite) lavorano in Ka e sono una evoluzione di quanto presentato in Ku: qui le catene RF superano il centinaio ed il riflettore raggiunge i 3,5 m di diametro, essendo limitati dallo spazio disponibile a bordo. In Figura 3 è mostrato il satellite Konnect VHTS realizzato in Francia e dotato di 4 riflettori di diametro > 3m con tecnologia thin shell deployabili dopo il lancio.



Figura 3: Konnect VHTS

Le prestazioni richieste ai sistemi in Ka stanno ulteriormente aumentando così come le applicazioni più specifiche verso il 5G ed il 6G che richiedono riflettori unfurlable a mesh dai 5m di diametro fino ai 12-18 m. La tecnologia per questi sistemi è attualmente in sviluppo in Europa (Germania ed Italia) mentre è disponibile negli Stati Uniti, in Cina ed in Russia da diversi anni. In particolare, le aziende più avanzate nel settore sono la Northrop Gumman e la Harris con decine di riflettori lanciati e correttamente dispiegati nello spazio.
In Figura 4 viene riportato un esempio di riflettore da 6 m di diametro in fase di studio in Italia nell'ambito di una missione scientifica su Marte per la mappatura dei ghiacci su quel pianeta. L'obiettivo dello studio è quello di realizzare un dimostratore del riflettore da 6 m sviluppando tutte le tecnologie necessarie (mesh, NET e deployable RING) ad un TRL (Technological Readness Level) 6 in grado di dimostrarne la fattibilità e poi poter procedere con lo sviluppo di un modello di qualifica. Questo riflettore dovrà nell'ambito della missione, garantire la comunicazione con la Terra in banda X e Ka e essere utilizzata dal Radar in band L per le acquisizioni della mappatura superficiale di Marte.

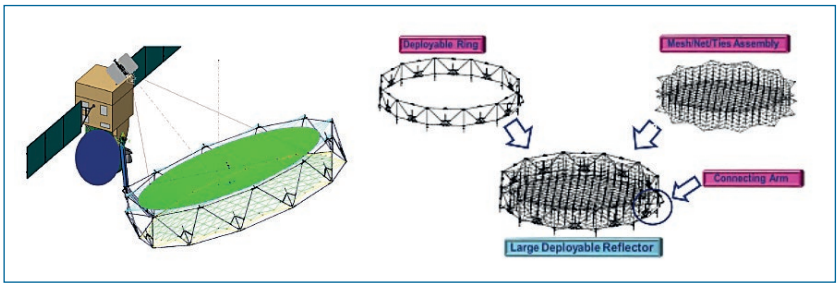


Figura 4: Riflettore unfurlable a mesh in sviluppo in Italia (missione Ice Mapper)

Questa tecnologia sarà quindi disponibile anche per altre applicazioni quali nuovi sviluppi di sistemi di comunicazione dalla banda UHF per comunicazioni militari alla realizzazione di satellite geostazionari VHTS di grandi dimensioni (classe di satellite 4-6 ton) in banda Ka dotati di più riflettori unfurlable con dimensioni > 5 m diametro. La stessa tecnologia potrà inoltre essere utilizzata per satelliti GEO di piccole dimensioni (3-5 m di diametro) per il trattamento di dati in aree domestiche.

I nuovi sistemi di comunicazione in orbita bassa LEO si stanno invece basando su antenne planari in Ka ad altissima flessibilità in grado di generare decine / centinaia di fasci indipendenti contemporaneamente con l'obiettivo di aumentare drammaticamente il riuso della banda di frequenza disponibile. Queste antenne sono costituite da phased array attivi di dimensioni ridotte (diametro di 200-300 mm max) ma dal numero di catene RF elevato da qualche centinaio a oltre 2000. Esse si basano su una fortissima integrazione della parte attiva ed il particolare della beam forming network che ne diventa il cuore principale. Le soluzioni attuali sono basate su chip multicore analogici che possono realizzare soluzioni fino a qualche decina di fasci, mentre soluzioni più avanzate, con centinaia di fasci indipendenti, richiede lo sviluppo di beam forming digitali molto costosi e basati sugli ultimi sviluppi tecnologici del settore (ASIC in tecnologia a 7 nm).

Antenne per l'Osservazione della Terra

I sistemi per l'osservazione della Terra si basano su strumenti atti a generare immagini della superficie terrestre tipo i sistemi SAR (Synthetic Aperture Radar) oppure a rilevare particolari parametri quali ad esempio i radiometri che permettono di rilevare le temperature sulla superficie del globo con elevata precisione. Relativamente ai sistemi radar, le Antenne utilizzate sono tipicamente basate su phased array attivi oppure su antenne a riflettore. Le frequenze di maggiore uso vanno dalla banda L (1,2 GHz), banda C (5,4 GHz) fino alla banda X (10 GHz) a seconda degli obiettivi delle rivelazioni effettuate. Le tecnologie abilitanti per questi sistemi sono principalmente basate su elementi radianti ad alta, efficienza e bassa cross polare e moduli T/R (trasmetti ricevi). La potenza di quest'ultimi può variare da pochi Watt (7-10 W in banda X), a qualche decina in banda C, fino a circa 150-200 W per sistemi in banda L. A seconda della frequenza considerata il numero di elementi può variare da alcune decine di elementi fino ad un migliaio. Con tale tecnologia è possibile realizzare antenne in grado di scandire e controllare elettronicamente il fascio e le sue caratteristiche principali quali lobi laterali e puntamento. Esempi che utilizzano phased array attivi sono disponibili in banda L (in Giappone con i sistemi Palsar 1 e 2) in Argentina con la missione Saocom, vedi Figura 5, ed attualmente in Europa dove è in corso lo sviluppo dell'antenna per la missione Rose_L, mostarta in Figura 6. In banda C va ricordata la missione Sentinel 1 dell'ESA, Figura 7, con due satelliti in volo e altri due che saranno lanciati a breve. In banda X invece vanno menzionate le missioni nazionali quali quella italiana con il sistema CSM (Cosmo Sky Med) e CSG (Cosmo Second Generation) e quella tedesca con due satelliti Terra-SarX e Tandem X. Le maggiori difficoltà sono legate alla sincronizzazione delle catene RF attive, all'elevato consumo che può variare da qualche KW a quasi 20 KW, ed alla relativa gestione del sistema termico per il controllo delle temperature. In tutti i casi anche la massa di queste antenne è importante variando tipicamente da 500-600 fino ad oltre 800 Kg ed inoltre la loro configurazione al lancio richiede che l'intera apertura sia organizzata in pannelli che vengono dispiegati dopo il lancio, per cui è necessario anche a meccanismi di tenuta e rilascio e di apertura, che possono essere motorizzati o

più semplicemente basati su molle. In generale queste antenne sono modulari basate su un certo numero di Tiles pienamente rappresentative del funzionamento complessivo dell'antenna attiva. In Figura 8 viene mostrata una delle 4 antenne realizzate per CSM costituita da 40 Tiles che lavorano in parallelo, e la tecnologia ad ibridi utilizzata per i moduli TR e per gli amplificatori intermedi utilizzati all'interno del Tile.

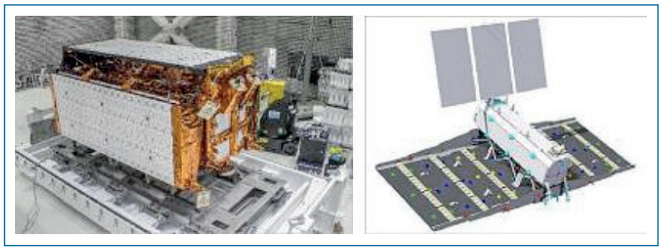


Figure 5: Saocom Satellite con l'Antenna in banda L chiusa e dispiegata



Figura 6:
Rose L con l'Antenna dispiegata



Figure 7: Sentinel 1 Satellite con l'Antenna in banda C chiusa e dispiegata

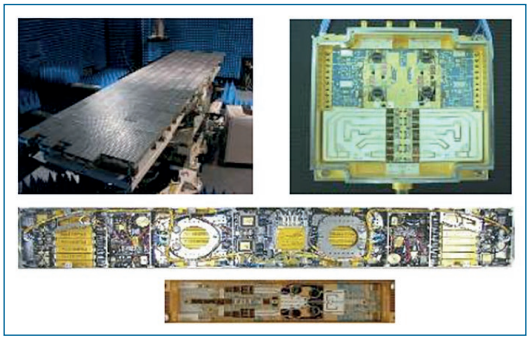


Figura 8: Antenna SAR di CSM, amplificatore intermedio, modulo T/Re vista interna del Tile

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 Effective 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/m2) e 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.

TECNOLOGIE ED APPLICAZIONI INNOVATIVE PER MINI E MICRO-SATELLITI

I mini e microsatelliti, che vanno da 1 kg a 500 kg, stanno ridefinendo l'industria spaziale. Con applicazioni nell'osservazione della Terra, nelle comunicazioni, nell'IoT e nelle tecnologie quantistiche, queste piattaforme compatte rappresentano l'avanguardia dell'innovazione tecnologica.

I fattori chiave che spingono questa crescita includono:

- **Progressi tecnologici:** integrazione di edge e cloud computing nello spazio, intelligenza artificiale, comunicazione ottica e sistemi quantistici.
- **Applicazioni in settori critici:** gestione dei disastri, sicurezza, connettività IoT e operazioni autonome.
- **Programmi globali:** iniziative come NextGenEU\IRIDE, ASI\ALCOR, la Greek National CubeSat Initiative e l'Atlantic Constellation testimoniano l'innovazione coordinata.

Tale espansione è sostenuta da:

- Crescente adozione di piccole costellazioni di satelliti.
- Crescente domanda di comunicazioni sicure e ad alta velocità e connettività IoT.
- Una crescente attenzione a soluzioni sostenibili e resilienti per la gestione dei disastri e la sicurezza.

Di certo i minisatelliti stanno diventando strumenti strategici fondamentali per affrontare le sfide globali legate alle emergenze e alla sicurezza. Nella gestione dei disastri, infatti, offrono capacità di rilevamento dei pericoli in tempo reale, integrazione IoT e processi decisionali autonomi, mentre nell'ambito della sicurezza nazionale, la comunicazione quantistica sicura, la ricognizione autonoma e una maggiore consapevolezza situazionale garantiscono una resilienza alle crisi supportata da una connettività affidabile e da processi decisionali robusti, anche in ambienti interrotti.
Nonostante le sfide come la complessità tecnica e gli ostacoli normativi, le opportunità abbondano per gli stakeholder del settore. Gli investimenti strategici nell'autonomia basata sull'intelligenza artificiale, nei sistemi quantistici minia

turizzati e nell'edge computing saranno fondamentali per plasmare il prossimo decennio di innovazione.

D'altro canto, le tendenze tecnologiche che stanno guidando la crescita sono caratterizzate dai progressi in vari settori. Ad esempio, l'In-Space Edge e il Cloud Computing stanno rivoluzionando il modo in cui elaboriamo i dati in tempo reale a bordo dei satelliti, riducendo la latenza e migliorando la reattività delle missioni. Inoltre, l'intelligenza artificiale e l'autonomia stanno diventando sempre più cruciali. Gli algoritmi di intelligenza artificiale alimentano operazioni autonome, rilevamento delle anomalie e processi decisionali in tempo reale, rendendo tutto più efficiente e preciso.

Le tecnologie quantistiche rappresentano un altro grande passo avanti. La comunicazione quantistica garantisce un trasferimento sicuro dei dati, mentre il rilevamento quantistico offre una precisione senza precedenti nel monitoraggio e nella difesa ambientale. Infine, le comunicazioni a bassa latenza e/o ad alta velocità stanno migliorando notevolmente. I sistemi di comunicazione ottici e quelli abilitati al 5G forniscono una connettività senza soluzione di continuità per le reti globali e l'Internet delle Cose (IoT), aprendo nuove possibilità per il futuro.

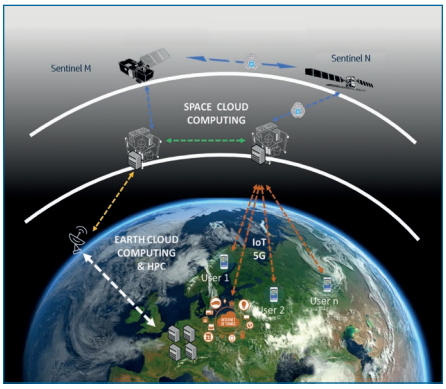


Figura 1: I mini satelliti rappresentano le fondamenta dell'ecosistema spaziale Spacedge

Priorità tecnologiche per i minisatelliti

Osservazione avanzata della Terra

I minisatelliti sono fondamentali per migliorare il modo in cui osserviamo e analizziamo la Terra, fornendo dati critici sia per le operazioni di routine che per le emergenze. Grazie a sensori ottici compatti con risoluzione inferiore al metro, possiamo monitorare disastri naturali, crescita urbana e salute agricola con grande precisione. L'imaging iperspettrale permette un'esplorazione accurata delle risorse, valutazioni ambientali dettagliate e sorveglianza militare efficace. I sistemi radar ad apertura sintetica (SAR) miniaturizzati offrono immagini in tutte le condizioni atmosferiche, giorno e notte, essenziali per la risposta ai disastri, il monitoraggio delle infrastrutture e la sicurezza. Inoltre, l'elaborazione dei dati a bordo, abilitata dall'intelligenza artificiale, consente di analizzare le immagini e rilevare anomalie in tempo reale, riducendo la dipendenza dall'elaborazione a terra e accelerando il processo decisionale.

Advanced In-Space Edge e cloud computing

L'informatica nello spazio sta trasformando i minisatelliti in nodi autonomi e intelligenti, capaci di prendere decisioni in tempo reale. Grazie all'edge computing integrato, questi satelliti possono elaborare grandi quantità di dati direttamente a bordo, riducendo la latenza e migliorando la reattività delle missioni. Gli algoritmi di intelligenza artificiale permettono di rilevare e dare priorità a eventi come pericoli ambientali o minacce alla sicurezza. Le reti cloud nello spazio consentono il calcolo collaborativo tra costellazioni satellitari, facilitando attività distribuite e l'allocazione dinamica delle risorse per gestire eventi ad alta priorità, come la risposta ai disastri. Inoltre, l'autonomia basata sull'intelligenza artificiale permette ai satelliti di programmare autonomamente le attività, regolare le orbite e adattarsi ai cambiamenti di missione senza necessità di intervento umano.

Sistemi di comunicazione avanzati

Sistemi di comunicazione affidabili e ad alta velocità sono essenziali sia per le operazioni di routine che per la risposta alle emergenze. La comunicazione ottica,

basata su laser, offre elevate velocità di trasmissione dati, cruciali per operazioni di difesa e emergenza. Le reti mesh e l'integrazione del 5G permettono alle costellazioni di satelliti di auto-organizzarsi, mantenendo la connettività anche in ambienti interrotti e supportando le reti IoT e le operazioni remote con soluzioni a bassa latenza. L'integrazione dell'IoT con l'Edge Computing consente l'elaborazione localizzata dei dati a bordo dei satelliti, riducendo i requisiti di trasmissione e permettendo approfondimenti in tempo reale. Questo coordinamento autonomo dei dispositivi IoT è utile in applicazioni come l'agricoltura intelligente, il monitoraggio della rete energetica e della catena di approvvigionamento. Inoltre, le applicazioni IoT di emergenza, come i sensori per sistemi di allerta precoce e il ripristino post-disastro, sono fondamentali per affrontare situazioni critiche.

Tecnologie quantistiche

I progressi quantistici stanno per rivoluzionare la comunicazione e il rilevamento nei sistemi spaziali. La Quantum Key Distribution (QKD) offre canali di comunicazione sicuri e praticamente impossibili da intercettare, essenziali per la difesa, i sistemi finanziari e lo scambio di dati governativi. Inoltre, Quantum Imaging e Metrology introducono nuovi metodi di imaging e remote sensing, permettendo un rilevamento ultrasensibile di cambiamenti gravitazionali, magnetici e ambientali. Questi avanzamenti trovano applicazioni nell'esplorazione delle risorse, nella previsione dei disastri e nella sorveglianza militare, aprendo nuove frontiere per la sicurezza e l'efficienza delle operazioni spaziali.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

I settori dei mini e microsatelliti si trovano in un momento critico, guidato dai rapidi progressi tecnologici, dalla crescente domanda del mercato e dall'evoluzione delle dinamiche geopolitiche. Questi piccoli satelliti, spesso di peso inferiore a 500 kg, presentano un approccio trasformativo alle operazioni spaziali, offrendo vantaggi unici come l'efficienza dei costi, tempi di sviluppo più rapidi e la capacità di dispiegarsi in costellazioni per diverse applicazioni. Tuttavia, la loro integrazione nel più ampio ecosistema spaziale non è priva di sfide. Comprende-

re questi ostacoli e le opportunità che presentano è essenziale per gli stakeholder che mirano a sfruttare appieno il loro potenziale.

Sfide e opportunità nell'ecosistema dei mini e microsatelliti

Congestione dello spazio e mitigazione dei detriti

La proliferazione di piccoli satelliti, specialmente in orbita terrestre bassa (LEO), ha intensificato le preoccupazioni per la congestione orbitale e i detriti spaziali. Con costellazioni come Starlink di SpaceX e iniziative europee pianificate come IRIDE e Atlantic Constellation, il rischio di collisioni ed effetti di detriti a cascata è in aumento. I quadri normativi, come quelli dell'Ufficio delle Nazioni Unite per gli affari dello spazio extra-atmosferico (United Nations Office for Outer Space Affairs - UNOOSA), e le innovazioni tecnologiche, come i sistemi autonomi di prevenzione delle collisioni, svolgeranno un ruolo cruciale nella mitigazione di questi rischi.

Gestione normativa e dello spettro

I mini e microsatelliti devono affrontare sfide legate alle licenze, all'assegnazione dello spettro e alla conformità alle norme internazionali. Man mano che sempre più nazioni ed enti privati entrano nel mercato dei piccoli satelliti, la concorrenza per le frequenze radio si intensifica, richiedendo un maggiore coordinamento attraverso organizzazioni come l'Unione Internazionale delle Telecomunicazioni (International Telecommunication Union - ITU).

Vincoli tecnici ed efficienza delle risorse

I piccoli satelliti sono intrinsecamente limitati in termini di capacità di carico utile, generazione di energia e durata di vita rispetto ai veicoli spaziali più grandi. I progressi nella miniaturizzazione, nell'efficienza energetica e nei sistemi di propulsione sono necessari per superare questi vincoli ed espandere le loro capacità funzionali.

Sicurezza e minacce informatiche

Con la loro maggiore autonomia e integrazione nelle infrastrutture critiche, i mini

e microsatelliti stanno diventando bersagli di attacchi informatici. Garantire solide misure di sicurezza informatica, in particolare per le applicazioni nella difesa e nella risposta alle emergenze, è una priorità.

Avanzamento dell'intelligenza artificiale e dell'edge computing

Le capacità di intelligenza artificiale ed edge computing integrate, come dimostrato dai programmi Φ-Sat-1 e AI-eXpress dell'ESA, stanno trasformando l'elaborazione dei dati nello spazio. Queste tecnologie consentono il processo decisionale in tempo reale, riducendo la dipendenza dalle stazioni di terra e migliorando le applicazioni nella risposta ai disastri, nel monitoraggio del clima e nelle comunicazioni sicure. Un'altra iniziativa ESA di interesse è quella del Cognitive Cloud Computing in Space (3CS), il cui obiettivo è sviluppare un'infrastruttura per l'elaborazione nello spazio, in linea con la visione dell'Agenda 2025 dell'ESA.

Leva strategica geopolitica ed economica

Le nazioni vedono i piccoli satelliti come strumenti per rafforzare la sovranità nelle operazioni spaziali, promuovere la crescita economica e affrontare le esigenze di sicurezza regionale. Programmi come IRIDE nell'ambito di NextGenEU dimostrano come le costellazioni satellitari possano fornire un'infrastruttura strategica per la trasformazione digitale e la resilienza dell'Europa.

Impatti ambientali e di sostenibilità

I piccoli satelliti contribuiscono a monitorare e mitigare le sfide ambientali, come la deforestazione, la gestione dell'acqua e le emissioni di carbonio. Consentendo l'agricoltura di precisione e il monitoraggio industriale, supportano anche gli obiettivi di sviluppo sostenibile.

Sinergie e partnership intersettoriali

La collaborazione tra i settori, come si vede nelle costellazioni ibride e nei partenariati pubblico-privato, amplifica l'impatto delle tecnologie satellitari di piccole dimensioni. Queste sinergie favoriscono l'innovazione e creano valore condiviso in aree come la risposta alle emergenze, la sicurezza informatica e l'ottimizzazione delle risorse.

Analisi di mercato per minisatelliti (2024-2030)

Il mercato dei minisatelliti sta assistendo a una rapida crescita, trainata dai progressi tecnologici, dall'aumento della domanda di servizi spaziali e dal calo dei costi di produzione e lancio dei satelliti.

Ad esempio, il mercato dell'osservazione della Terra è destinato a raggiungere i 6,5 miliardi di dollari entro il 2030, grazie alle crescenti esigenze ambientali e di gestione delle risorse. Le tecnologie quantistiche, con la comunicazione quantistica e il quantum sensing, stanno rivoluzionando il settore, con previsioni di crescita da un mercato di nicchia di 200 milioni di dollari nel 2024 a 1 miliardo di dollari entro il 2030 soprattutto nel campo della difesa e delle comunicazioni sicure. L'Edge Computing è previsto crescere significativamente, passando da 500 milioni di dollari nel 2024 a 3 miliardi di dollari entro il 2030, trasformando l'elaborazione dei dati e l'autonomia in orbita. Parallelamente, il mercato dell'intelligenza artificiale e dell'autonomia nello spazio è previsto crescere a un tasso annuo composto del 25%, raggiungendo 1,5 miliardi di dollari entro il 2030, con applicazioni che spaziano dall'ottimizzazione del carico utile alla navigazione autonoma dei minisatelliti. Anche il mercato dell'IoT satellitare è in forte espansione, con un tasso di crescita annuo composto del 24%, raggiungendo 2,5 miliardi di dollari entro il 2030, grazie alla crescente domanda in agricoltura, logistica e infrastrutture delle smart city. Infine, i sistemi di comunicazione avanzati per i piccoli satelliti sono previsti crescere da 3 miliardi di dollari nel 2024 a 8 miliardi di dollari entro il 2030, sostenuti dalla domanda di comunicazioni ottiche ad alta velocità e dall'adozione delle tecnologie 5G e di rete mesh.

Spinto dalla domanda di soluzioni convenienti, scalabili e versatili, il mercato globale dei minisatelliti, valutato tra i 9 e i 12 miliardi di dollari nel 2024, è destinato a crescere a un tasso annuo composto superiore al 20%, raggiungendo i 25-30 miliardi di dollari entro il 2030. Questa crescita è alimentata dall'adozione crescente da parte di aziende private, governi e settori della difesa, nonché dalla domanda di osservazione della Terra, integrazione IoT e connettività globale.

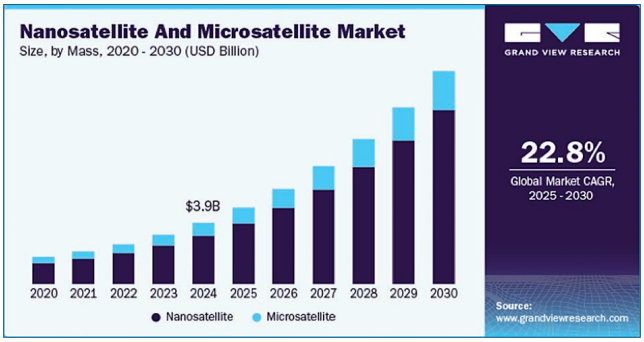


Figura 2: Andamento del mercato Nanosatellite e Microsatellite 2020 - 2030. (Fonte: www.grandviewresearch.com)

Il panorama competitivo vede protagonisti sia attori commerciali come SpaceX, Planet Labs, Rocket Lab, Astroscale e Blue Canyon Technologies, sia enti pubblici come NASA, ESA, ISRO e CNSA. L'Asia-Pacifico sta diventando un attore forte grazie agli investimenti di India, Cina e Giappone, con un tasso di crescita annuo composto previsto del 16,4% tra il 2021 e il 2030.

Le tendenze che influenzano le dinamiche di mercato includono la crescente domanda di lanci a basso costo e ad alta frequenza, supportati da tecnologie di razzi riutilizzabili, l'aumento degli investimenti in piccole costellazioni satellitari per una copertura globale continua e la crescente collaborazione tra aziende private e agenzie spaziali nazionali.



Figura 3: Le regioni in aumento più elevato del mercato dei nanosatelliti e dei microsatelliti (Fonte: www.grandviewresearch.com)

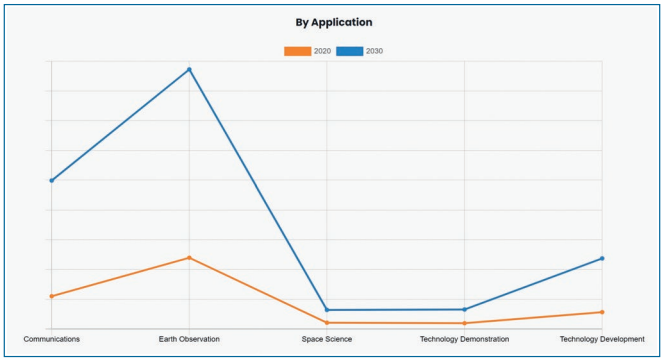


Figura 4: Crescita del mercato delle applicazioni nanosatellitari e microsatellitari. (Fonte: www.alliedmarketresearch.com)

Principali segmenti di domanda

Il mercato dei nanosatelliti e dei microsatelliti è segmentato principalmente in quattro settori: governo, commerciale, difesa e sicurezza, e civile.

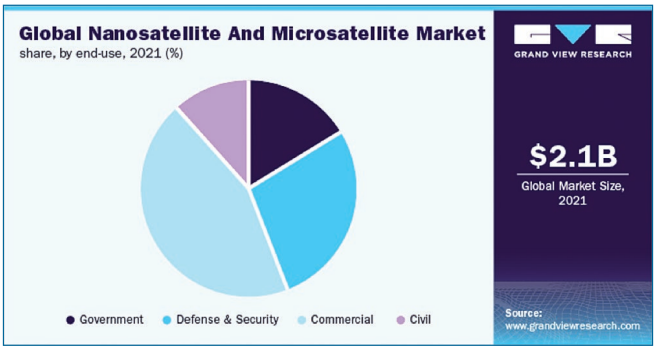


Figura 5: Utenti finali del mercato globale dei nanosatelliti e dei microsatelliti 2021 (Fonte: www.grandviewresearch.com)

Le agenzie governative come NASA e ISRO utilizzano questi piccoli satelliti per migliorare l'esplorazione spaziale, ridurre i costi delle missioni e migliorare l'accesso allo spazio, con applicazioni che includono la gestione dei disastri, le previsioni meteorologiche e il monitoraggio agricolo. Il settore commerciale ha dominato il

mercato nel 2021 con una quota di fatturato del 44%, grazie al ruolo dei satelliti in LEO e GEO (Geostationary Orbit) nella trasmissione, navigazione e comunicazione, essenziali per televisione, radio e previsioni del tempo. Nel campo della difesa e sicurezza, i piccoli satelliti sono fondamentali per le comunicazioni militari, la navigazione, la raccolta di informazioni, il rilevamento di missili e il miglioramento dell'affidabilità del GPS, rappresentando il 27% delle entrate del mercato nel 2021. Infine, nel settore civile e scientifico, i satelliti supportano la ricerca scientifica e l'esplorazione spaziale, contribuendo alla comprensione di pianeti, stelle e altri sistemi spaziali attraverso tecnologie avanzate. La crescente domanda di osservazione della Terra, con un mercato previsto di 6,5 miliardi di dollari entro il 2030, è trainata dal monitoraggio ambientale, agricolo e urbano, mentre le costellazioni di comunicazione basate su LEO come Starlink e OneWeb, con un fatturato cumulativo previsto di oltre 50 miliardi di dollari entro il 2030, stanno rivoluzionando la connettività globale. Le soluzioni spaziali per la risposta ai disastri e la sicurezza nazionale, con una crescita prevista del 22% CAGR, raggiungeranno i 5 miliardi di dollari entro il 2030, grazie a tecnologie come la comunicazione quantistica sicura e la sorveglianza autonoma.

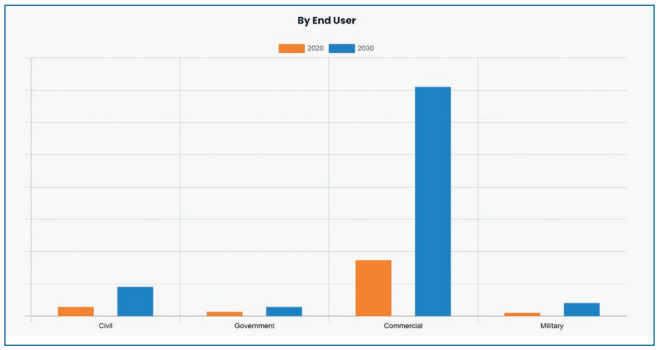


Figura 6: Crescita degli utenti finali del mercato dei nanosatelliti e dei microsatelliti (Fonte: www.alliedmarketresearch.com)

Opportunità per gli stakeholder

Le opportunità per gli stakeholder nel settore spaziale sono immense e variegate. Le startup e le piccole e medie imprese (PMI) possono innovare nell'edge compu-

ting e nell'intelligenza artificiale per i CubeSats, sviluppando piattaforme pronte per le applicazioni ad alta sicurezza. Le aziende spaziali consolidate, invece, possono espandersi in servizi che combinano AI, IoT ed elaborazione edge in tempo reale, collaborando con i governi per soluzioni di difesa e gestione dei disastri. I governi e i policy-makers hanno il compito di incoraggiare le collaborazioni pubblico-privato per accelerare i progressi tecnologici e sostenere quadri normativi che facilitino la diffusione dell'AI e delle tecnologie quantistiche.

I mini e microsatelliti stanno trasformando la risposta alle emergenze, migliorando la capacità di rilevare pericoli in tempo reale e diffondere dati critici. Dotati di edge computing, questi satelliti possono elaborare dati a bordo, rilevando immediatamente pericoli come inondazioni, incendi e terremoti. Le reti di sensori abilitate per l'IoT, supportate dai satelliti, migliorano il coordinamento e la diffusione di allarmi critici, soprattutto nelle aree remote. Nel settore della sicurezza, i microsatelliti autonomi offrono nuovi strumenti per la difesa e la sorveglianza, mentre le tecnologie quantistiche garantiscono comunicazioni sicure e inviolabili, essenziali per la trasmissione di informazioni sensibili.

Inoltre, i mini e microsatelliti giocano un ruolo cruciale nella sostenibilità ambientale, consentendo un monitoraggio efficiente delle risorse naturali. Grazie all'intelligenza artificiale, questi satelliti possono analizzare grandi quantità di dati ambientali, monitorando indicatori di cambiamento climatico e facilitando l'agricoltura di precisione. Le sinergie integrate tra queste capacità offrono vantaggi intersettoriali, migliorando la sicurezza civile e militare, supportando i trattati globali sulle emissioni di carbonio e consentendo un monitoraggio intelligente delle infrastrutture critiche.

Stato dell'arte

I minisatelliti e le tecnologie correlate vengono sfruttati in numerosi programmi internazionali per affrontare le sfide urgenti nell'osservazione della Terra, nelle comunicazioni, nell'IoT e nella sicurezza.

Per capire quanto sia importante tentare di tenere il passo con il resto del mondo, basta osservare che la NASA dedica un report dal titolo "*Small Spacecraft Techno*

logy State Of The Art",[1] che viene aggiornato di continuo (ultimo update Febbraio 2024) 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, struttura, materiali e meccanismi, controllo termico, comandi e data handling, comunicazioni, integrazione, lancio e deployment, segmento di ground e operations, sistemi di de-orbitaggio passivi. In Italia varie Università (Bologna, Roma, Politecnico di Torino, Politecnico di Milano) hanno già acquisito una notevole esperienza con nano/pico satelliti o hanno iniziato a mettere in piedi laboratori spaziali per lo sviluppo e l'integrazione di nanosatelliti (Politecnico di Bari ad esempio).
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 minisatelliti 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. Nel 2025 **PLATiNO** avrà a disposizione 3 payload differenti che verranno integrati o lanciati in diverse configurazioni: 5 satelliti iperspettrali per IRIDE, 2 VHR e un SAR per ASI.
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 microsatellite 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).

D-ORBIT, all'interno del programma IRIDE lancerà un SAR in banda X di nome **NOX** con un peso di poco inferiore ai 600 kg, al limite per la definizione di minisatellite. In Thales Alenia Space in Italia sono in via di sviluppo, da qualche anno, due versioni di piattaforma specializzata per mini/microsatelliti, **NIMBUS-S** per

[1] *https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2024/03/soa-2023.pdf?emrc=8ad1a1*

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 microsatelliti. 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). Nel 2025 le piattaforme **NIMBUS** lanceranno per IRIDE 12 satelliti SAR e un satellite VHR.
OHB ha invece sviluppato la piattaforma **EAGLET** che imbarcherà una costellazione di 24 satelliti da 25 kg con payload multispettrali ad alta risoluzione.
ARGOTEC, sempre nel programma IRIDE, fornirà 25 satelliti **HEO** (Hawk for Earth Observation) da 70 kg con payload multispettrale a 8 bande.

I **sensori** e gli **attuatori** per il controllo di assetto di micro e minisatelliti 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 a 1°, mentre per micro e minisatelliti 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.

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 estensione 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*".

Per quanto riguarda gli strumenti, oltre a quanto detto per i satelliti HEO, EAGLET, PLATINO, NIMBUS e NOX della costellazione IRIDE va evidenziato il ricorso sempre maggiore a 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.

Di seguito sono riportati esempi chiave che illustrano il potenziale trasformativo di questi sistemi:

Iniziative europee nell'ambito di NextGenEU

NextGenEU IRIDE (Italia):

- Obiettivo: Una costellazione ibrida di osservazione della Terra che combina satelliti ottici e radar per migliorare il monitoraggio ambientale, la risposta ai disastri e la protezione delle infrastrutture critiche. Una panoramica delle diverse costellazioni coinvolte è fornita in Figura 7.
- Ambito di applicazione: Nell'ambito del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza italiano, IRIDE dispiegherà 13 satelliti entro il 2026, dotati di SAR (Synthetic Aperture Radar) e carichi ottici all'avanguardia. Le funzionalità avanzate di elaborazione dei dati nello spazio garantiscono analisi ad alta frequenza e in tempo reale.

NextGenEU Grecia:

- Obiettivo: Si concentra sulla costruzione dell'infrastruttura spaziale greca per supportare la gestione ambientale e dei disastri, sfruttando le capacità di osservazione della Terra integrate con le iniziative spaziali europee come Copernicus.



Figura 7: Costellazioni IRIDE.
(Fonte: ESA - Avanti con la costellazione italiana di satelliti per l'osservazione della Terra)

Programmi collaborativi

Costellazione atlantica:

• Obiettivo: Un'iniziativa multinazionale che coinvolga il Portogallo e la Spagna, finalizzata all'osservazione della Terra, alla sorveglianza marittima e al monitoraggio del clima nella regione atlantica. Questa costellazione esemplifica la tendenza verso le partnership regionali nella tecnologia spaziale, promuovendo la condivisione di risorse e dati.

Concetti di costellazione ibrida:

• Obiettivo: Sistemi come IRIDE riflettono il modello di costellazione ibrida, combinando tecnologie SAR e ottiche per fornire capacità di osservazione e comunicazione avanzate. Queste configurazioni sono progettate per la versatilità in scenari multi-missione, rispondendo sia alle esigenze commerciali che a quelle di sicurezza

Programmi dell'Agenzia Spaziale Italiana

Programma ALCOR:

• Obiettivo: Progettato per far progredire le tecnologie dei nanosatelliti per i servizi in orbita come il volo in formazione, l'ispezione in orbita e le operazioni autonome. Una panoramica delle diverse missioni è mostrata in Figure 8.

• Un esempio: l'iniziativa SpEye, che coinvolge due satelliti, un Free Flyer (6U CubeSat) e un Carrier Satellite, dimostra capacità come il rendezvous autono

mo e la navigazione avanzata. Ciò riflette l'integrazione dell'autonomia guidata dall'intelligenza artificiale e dell'edge computing nelle piattaforme nanosatellitari.

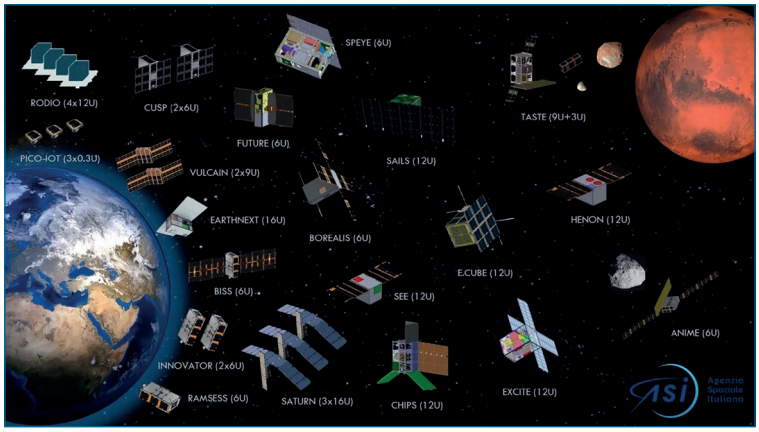


Figura 8: The ALCOR Fleet. (Fonte; ASI | Agenzia Spaziale Italiana)

Platino:

- Obiettivo: Una piattaforma satellitare flessibile che supporti carichi utili di imaging ottico e radar, progettata per applicazioni a duplice uso (civile e di difesa). Platino è in linea con l'enfasi dell'Europa sulla miniaturizzazione e la modularità nella progettazione dei satelliti.

Dimostratori tecnologici verso la commercializzazione

All'interno della traiettoria strategica delineata nell'Agenda 2025 dell'ESA, che dà priorità alla commercializzazione, all'innovazione e a partnership più ampie nel settore spaziale, si colloca il programma InCubed AI-eXpress (AIX) dell'ESA, guidata da Planetek Italia insieme a D-Orbit e AIKO. AIX ha visto il lancio del suo primo satellite il 14 Gennaio 2025 a cui seguiranno altri due lanci, rispettivamente a giugno e ad ottobre 2025. AIX opera come dimostratore tecnologico, facendo progredire l'elaborazione dei dati in orbita attraverso applicazioni di intelligenza artificiale e blockchain configurabili e on-demand, come mostrato nel flusso di lavoro rappresentato in Figura 9. Ciò riduce la latenza dei dati, migliora la sicurezza dei dati e accelera il percorso dalla dimostrazione tecnologica alle soluzioni com-

merciali scalabili. Consentendo agli utenti di caricare e distribuire applicazioni per i satelliti, AIx supporta la creazione di servizi di osservazione della Terra (EO) su misura, nonché innovazioni nella risposta ai disastri, nella sicurezza e nell'IoT.



Figura 9: Flusso di lavoro AI-eXpress.

Risorse economiche necessarie

Per le risorse economiche necessarie stimate per ciascuna tecnologia a più basso TRL o a più alto impatto innovativo, si veda la Tabella 1.

Tecnologia prioritaria	Investimento necessario
High Performance On Board Computer	30 M€
On board AI based algorithms	50 M€
Canali di comunicazione avanzati – 5G/6G	30 M€
Canali di comunicazione avanzati – IoT	30 M€
Canali di comunicazione avanzati – ISL	100 M€
Canali di comunicazione avanzati – QKD	50 M€
Quantum Imaging	50 M€
Quantum based PNT	50 M€
Quantum in situ sensors	50 M€
Architetture ibride di costellazioni di microsatelliti	30 M€
Servizi Cloud in Space	50 M€
Infrastrutture Cloud in Space	100 M€

Tabella 1: Risorse economiche necessarie

Bibliografia

- Doe, A. (2024). The Future of Microsatellites.Space Innovations, 12(1), 67-89.
- Green, P. (2023). Methodologies in Space Technology Research. Research Methods in Space Science, 5(4), 201-215.
- White, D. (2023). The Rise of Microsatellites. Satellite Technology Today, 29(4), 145-160.
- Black, H. (2024). CubeSats: A New Era in Space Exploration. NASA Technical Reports, 12(3), 78-95.
- Johnson, P. (2024). Competitive Analysis of the Microsatellite Market. Market Insights, 19(2), 67-82.
- Brown, S. (2024). National Policies Supporting Space Innovation. Government Technology Review, 15(1), 45-60.
- Adams, P. (2024). Economic Opportunities in the Space Sector. Business and Technology Review, 21(2), 78-95.
- NextGenEU and IRIDE Program: Official EU reports or white papers about their space-related projects and satellite communications strategies, *https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Italy/Firma_Contratti_IRIDE*
- Greek National CubeSat Initiative: Documentation from Greek national space agencies or university-led satellite research programs, *https://www.esa.int/Applications/Connectivity_and_Secure_Communications/ESA_backs_Greek_firms_and_universities_CubeSats*
- ALCOR, the new ASI program dedicated to the development of small satellites, https://www.asi.it/en/technologies-and-engineering/micro-and-nanosatellites/alcor-program/
- The atlantic constellation, https://europeanspaceflight.com/esa-awards-contracts-for-spains-contribution-to-atlantic-constellation/
- AI-eXpress, *https://incubed.esa.int/portfolio/aix/*
- ESA cognitive cloud computing in Space initiative, https://www.esa.int/Enabling_Support/Preparing_for_the_Future/Discovery_and_Preparation/The_Discovery_Campaign_on_cognitive_cloud_computing
- ESA agenda 2025, https://www.esa.int/About_Us/Introducing_ESA_Agenda_2025

TECNOLOGIE PER RADAR DA OSSERVAZIONE DELLA TERRA

L'Osservazione della Terra per mezzo di strumenti radar da satellite ha raggiunto in questi anni un altissimo livello di operatività. Nello specifico, la possibilità di osservare scene di interesse dallo spazio, anche in situazioni proibitive per i sensori ottici (ad esempio, si pensi al caso in cui l'osservazione avvenga di notte o a quello in cui una coltre di nuvole, una fitta cortina di fumo o una nube di pulviscolo nascondano la scena al sensore) ed il ricco contenuto di informazione che può essere estratto da mappe di riflettività acquisite nel dominio delle micro-onde hanno determinato il successo dei così detti "Radar d'Immagine" e, in particolare, dei "Radar ad Apertura Sintetica" (*Synthetic Aperture Radar, SAR*), che hanno la proprietà di garantire elevate prestazioni di risoluzione, anche quando la distanza di osservazione sia quella tipica di un satellite, ovvero svariate centinaia di chilometri. Questa particolare proprietà di osservazione è ottenuta grazie ad un'opportuna elaborazione dei dati di eco, possibile quando lo strumento viaggia su una piattaforma in movimento rispetto all'oggetto dell'osservazione.

La disponibilità di dati di osservazione radar da satellite, un tempo possibile solo grazie a missioni istituzionali ed oggi sempre più ricca, anche grazie al fiorire di numerose iniziative di carattere commerciale, ha portato in questi ultimi vent'anni a sviluppare una molteplicità di applicazioni, in campi che vanno dalla protezione civile, al monitoraggio dell'ambiente terrestre e marino, fino alla sorveglianza del territorio, anche per scopi di sicurezza dei confini e di difesa. In virtù di questo nuovo scenario, una grande varietà di utenti istituzionali, scientifici e commerciali ha maturato una maggiore consapevolezza delle proprie esigenze di capacità di osservazione e questo sta consentendo all'industria di ricevere requisiti operativi e prestazionali sempre meno generici, con la possibilità di concepire e sviluppare soluzioni ottime rispetto all'impiego finale.

In base alla specifica esigenza operativa supportata, si possono identificare i seguenti tipi di radar da satellite e le seguenti tecniche di elaborazione del dato:

- SAR ad uso duale[1], per l'osservazione di specifiche zone di interesse, con capacità di risoluzione spintissima e basso tempo di rivisita.
- SAR per l'osservazione a media risoluzione su *swath* estese[2], per il monitoraggio ambientale globale.
- SAR a risoluzione spinta e bassissimo tempo di rivisita, per sorveglianza ed early warning in ambito militare.
- Tecniche di elaborazione per la rivelazione e l'identificazione di bersagli in movimento (moving target detection e moving target identification).
- Tecniche di fusione dei dati (data fusion) acquisiti da strumenti SAR che lavorano in diverse bande della radio-frequenza (Multi-band SAR) e di dati ottici ad alta risoluzione (Very High Resolution, VHR).
- Tecniche per il riconoscimento automatico di bersagli su immagini SAR (Automatic Target Recognition, ATR).
- SAR LEO[3] e GEO[4], per il monitoraggio accurato dei fenomeni di subsidenza e della stabilità di edifici e di infrastrutture.

È giusto notare che questa lista non ha alcuna pretesa di completezza, ma ci consente comunque di inquadrare meglio i temi di interesse che approfondiremo nel corso di questa trattazione.

Gli strumenti SAR sono in grado di garantire risoluzioni sub-metriche lungo la coordinata di distanza grazie all'impiego di bande di segnale molto elevate (tipicamente centinaia di MHz). Una analoga capacità si può ottenere anche rispetto alla direzione di moto del satellite, a patto di osservare la scena secondo geometrie di acquisizione che garantiscano significative variazioni dell'angolo di vista (tipicamente qualche grado). Nello specifico, questo tipo di risultato può essere ottenuto aggiornando continuamente la direzione di osservazione dello strumento, così da puntare sempre la medesima zona a terra.

È facile capire che questa soluzione comporta una conseguente limitazione della dimensione della scena osservabile, dato che il tempo di acquisizione viene im-

[1] *Si definisce duale uno strumento di osservazione o una missione che siano destinati sia all'uso civile che a quello militare.*

[2] *Tipicamente si parla di radar ad ampia swath, essendo questo il termine inglese utilizzato per indicare il parametro che misura l'estensione della scena acquisita, nella direzione perpendicolare alla traccia disegnata a terra dalla traiettoria del satellite.*

[3] *Il termine LEO deriva da Low Earth Orbit ed è l'acronimo usato per indicare le orbite basse attorno alla Terra.*

[4] *Il termine GEO deriva da GEosynchronous Orbit ed è l'acronimo usato per indicare le orbite geosincrone.*

piegato per osservare sempre lo stesso spot a terra. D'altra parte, la prestazione di *swath* è solitamente soddisfacente, considerando che la richiesta di risoluzioni spintissime si associa di solito all'esigenza di poter apprezzare in maniera minuziosa i dettagli di una scena, anche di estensione limitata, che magari sia stata precedentemente identificata con altre tecniche di scoperta. Le esigenze operative degli utenti che impiegano questo tipo di immagini SAR sono invece spesso associate al desiderio di poter collocare queste spot ad altissima risoluzione all'interno di un'area di interesse molto ampia (>500 km), inoltre spesso si vogliono avere osservazioni estremamente frequenti sull'area di interesse, potendo spostare il centro di acquisizioni successive in tempi estremamente rapidi, così da piazzare osservazioni ripetute nell'intorno di un certo obiettivo, in corrispondenza di un unico passaggio del satellite.

A livello di progetto, le suddette caratteristiche operative possono essere garantite giocando su due fattori che determinano la geometria di osservazione del radar: l'impego di un tipo di orbita ad hoc e un'importante agilità di puntamento. In particolare, prediligere un'orbita inclinata che sia opportunamente progettata per massimizzare le opportunità di acquisizione sull'area di interesse è la prima soluzione ingegneristica da introdurre. L'agilità di puntamento necessaria allo scopo di piazzare più immagini su un teatro di acquisizione – ma anche utile per spingere la risoluzione in *along-track* – può essere invece ottenuta impiegando più soluzioni alternative, con impatti differenti sulla complessità dei vari elementi che compongono il satellite. Un modo per spostare la direzione di puntamento del radar con grande rapidità è quello di dotare l'antenna di una capacità di puntamento elettronico del fascio (*electronic beam steering*), in alternativa o in aggiunta possiamo ottenere il medesimo effetto sfruttando opportune manovre della piattaforma satellitare (*mechanical beam steering*). Le soluzioni progettuali per la realizzazione di uno *steering* elettronico del fascio di antenna possono essere diverse, tra queste particolare interesse rivestono le soluzioni basate su antenna planare attiva che, grazie all'impiego di molteplici moduli trasmetti-ricevi (T/R Module) riconfigurabili su basi temporali di pochi millisecondi, consentono

di aggiornare sia la forma che la direzione di puntamento del fascio di antenna. Nel caso di steering meccanico, la funzione di movimentazione del fascio del radar sarà in carico agli elementi del sistema di controllo di assetto della piattaforma (*Attitude Orbit Control System, AOCS*) e si realizzerà tramite ruote di inerzia o, per i sistemi più performanti, grazie all'utilizzo di *Contro/Momentum Gyro* (CMG). In particolare, i CMG consentiranno manovre di ripuntamento estremamente rapide, minimizzando i tempi di tranquillizzazione tra acquisizioni successive e garantendo l'acquisizione di immagini molto ravvicinate nel tempo e nello spazio, così da comporre un mosaico che restituisca una visione estesa e molto dettagliata dell'area in osservazione ad ogni singolo passaggio del satellite.

Questione a sé riguarda la continua domanda di miglioramento della risoluzione cross-track, che è principalmente perseguita grazie a quelle soluzioni tecnologiche avanzate, nel campo dell'elettronica e della fotonica, che consentono di estremizzare la banda di segnale gestibile dagli apparati di bordo.

Il cambiamento climatico e la gestione di fenomeni metereologici straordinari sono argomenti al centro delle politiche nazionali e mondiali di questi anni. La Comunità Europea ha individuato nel Sistema Copernicus lo strumento che lo spazio mette al servizio delle istituzioni e della scienza per fornire un monitoraggio preventivo ed operativo di questi fenomeni. Le Sentinelle, i diversi satelliti che compongono l'infrastruttura spaziale del Sistema Copernicus, sono già operative con successo e saranno potenziati vuoi per garantire la continuità operativa dei satelliti in volo, con prestazioni aumentate allo stato dell'arte, vuoi per arricchire il sistema di nuovi tipi di sensori e di nuove modalità di osservazione. Il processo di potenziamento della flotta delle Sentinelle riguarda anche la componente SAR del sistema e prevede il lancio di nuovi satelliti equipaggiati con strumenti che operano in banda L (1.2575 GHz di frequenza centrale) e l'introduzione di una nuova generazione del SAR della Sentinella-1, il radar in banda C (5.405 GHz di frequenza centrale) che ha fatto da precursore per questo tipo di missione. In entrambi i casi, le caratteristiche dei radar definite dall'Agenzia Spaziale Europea

porteranno a sviluppare una nuova generazione di strumenti, capaci di forzare il vincolo tra risoluzione ed estensione della swath a cui obbediscono le tecniche di acquisizione classiche, consentendo di ottenere risoluzioni dell'ordine dei metri associate a swath di centinaia di chilometri.

Tralasciando le specificità ed i dettagli realizzativi che caratterizzano ciascuna di queste due soluzioni, possiamo identificare in due funzionalità chiave quanto necessario per ottenere il tipo di prestazione che caratterizza questo tipo di SAR, che in letteratura è comunemente indicata con il nome di *High Resolution Wide Swath*. La prima caratteristiche che consente di migliorare la risoluzione *along-track*, anche nel caso di un SAR che sia disegnato per coprire una swath elevata, è legata alla diversità di osservazione associata alla possibilità di ricevere separatamente il segnale di eco da differenti aree della medesima antenna. La seconda, che consente di ricevere livelli di segnale consoni nonostante la vasta area da osservare, è relativa alla capacità di stringere il fascio in ricezione e di spostarlo rapidamente sulla scena, lunga la coordinata di *cross-track*, così da catturare l'eco con il massimo guadagno di antenna man mano che questo si genera e si propaga (tecnica dello *Scan-On-REceive o SCORE*). Da un punto di vista architetturale, la realizzazione delle due funzioni descritte sopra, si porta dietro la necessità di segmentare l'antenna, giocando su più canali in ricezione. In funzione della banda operativa dello strumento e delle prestazioni di ottenere, potremo scegliere soluzioni di progetto differenti ma in generale questo tipo di SAR beneficerà dalla possibilità di sfruttare un'elettronica digitale con capacità di elaborazione molto spinta, per realizzare tecniche di *Digital Beam Forming* e di filtraggio e compressione del dato a bordo, che consentano di ottenere le prestazioni richieste a fronte di una mole di dati gestibile dal sotto-sistema di *down-link*, che ha il compito di scaricarli verso le stazioni di Terra.

Più in generale, in funzione delle applicazioni di interesse e delle esigenze dell'utente, le funzionalità distintive di questo tipo di strumenti possono includere anche capacità multi-polarimetriche (*Dual Pol, Quad Pol, Compact Pol*) e/o capacità

di osservazione in più bande (ad esempio, bande P, L e C), per sfruttare il diverso grado di penetrazione dell'onda elettromagnetica e le diverse caratteristiche di interazione con la scena.

La realizzabilità di questo tipo di strumenti SAR è subordinata alla disponibilità di tecnologie innovative per lo spazio, nelle seguenti aree:

- Gestione separata di partizioni o fasci di antenna, che porta a dover progettare strumenti multi-canale.
- Capacità di campionare il segnale di eco ad alta frequenza (*high frequency Analog-to -Digital Converter, ADC*), riducendo o eliminando la sezione di conversione di frequenza, a beneficio della semplificazione dell'equalizzazione e della calibrazione dei molteplici canali in ricezione.
- Capacità di elaborazione di grosse moli di dati a bordo, con implicazioni molto sfidanti per le architetture delle unità digitali del radar, che devono prestarsi a implementare algoritmi di gestione del fascio radar basate su *Digital Beam Forming*.
- Evoluzione delle tecnologie di antenne attive e passive, verso la realizzazione di grosse superfici radianti che assumano configurazioni estremamente compatte al lancio (un esempio di questo tipo di soluzioni è rappresentato dai *Large Deployable Reflector*, in cui l'innovazione tecnologica risiede soprattutto nella meccanica di dispiegamento del riflettore in volo e nel controllo termomeccanico attivo della sua superficie a *mesh*).

La dimostrata capacità di ridurre sensibilmente la massa dei satelliti di osservazione SAR ha aperto la strada alla progettazione di costellazioni molto numerose (>20 satelliti), che consentono di abbattere drasticamente i tempi di rivisita rispetto al passato. La realizzazione di queste costellazioni porta a rivedere il concetto di strumento, accettando di sacrificare alcuni parametri di immagine ottenibili a livello di singolo satellite o progettando il radar rispetto a compiti di osservazione molto specifici (l'alta risoluzione su *swath* limitate, ad esempio), così da poter limitare le risorse di bordo necessarie al radar, rendendole compatibili con quelle che tipicamente possono essere messe a disposizione da un Micro-Satellite.

Il vantaggio immediato di questo tipo di costellazioni è quello di poter migliorare sensibilmente le prestazioni di copertura e di tempo di rivisita di un sistema di osservazione, rendendo possibili osservazioni capillari e frequenti su aree molto vaste. Queste costellazioni risultano essere estremamente attraente di per sé, specialmente per quelle applicazioni che vedono nella tempestività dell'osservazione il primo parametro da perseguire. In aggiunta, guardando alla possibilità di integrare più capacità di osservazione nell'ambito di segmenti spaziali complessi o pensando all'opportunità di definire "sistemi di sistemi" che sfruttino asset spaziali concepiti con obiettivi diversificati, esse ben si prestano a fornire un servizio di monitoraggio continuo, che consenta di identificare tempestivamente fenomeni di interesse, su cui concentrare la successiva osservazione di altri sensori, spaziali e non. Questo paradigma di osservazione radar ha valenza generale ma si presta in modo particolare per la realizzazione di sistemi di sorveglianza del territorio e dei mari.

Dal punto di vista realizzativo, pensare ad una costellazione di decine di satelliti SAR non è più considerato un esercizio accademico e diversi player che operano nel settore del così detto *New Space* hanno iniziato a dispiegare satelliti in volo, con l'obiettivo di dotarsi di questo tipo di capacità di osservazione. Come detto, la necessità di spingere il parametro di cardinalità della costellazione ha portato a ripensare l'approccio al progetto del singolo satellite SAR, semplificandone le caratteristiche e le prestazioni, con lo scopo di ridurre i costi, tanto da rendere economicamente sostenibile la realizzazione e la messa in opera di queste costellazioni. Questo ha portato a rivedere i processi applicati nell'industria spaziale ed ha favorito l'innesto in ambito spaziale di nuove tecnologie, tipicamente applicate in altri contesti. I soggetti dell'industria spaziale che hanno fatto da apripista in questo processo, spesso start-up nate per sviluppare un singolo progetto, hanno infranto il tabù delle rigide norme di qualità degli standard spaziali, accettando la prospettiva di un più alto tasso di fallimento nella vita dei singoli satelliti, a vantaggio di un'apertura all'impiego di componentistica commerciale, con l'obiettivo di ricercare una forte riduzione dei costi e un'ottimizzazione della massa

dell'*hardware*. In aggiunta, la revisione degli archetipi delle architetture di satellite, a favore di una integrazione sempre più spinta tra le funzioni dello strumento e quelle della piattaforma è stata un'altra soluzione ingegneristica chiave, che ha contribuito alla realizzazione di questo tipo di satelliti di osservazione.

L'impatto della rivoluzione *New Space* ha spinto anche la grande industria a considerare un cambio di prospettiva nell'approccio al progetto ed ha favorito un rapido salto del livello di tecnologia disponibile per sviluppare i SAR da satellite, avvicinando lo spazio alle prestazioni offerte dall'elettronica commerciale.

Adesso, dopo una prima fase pionieristica, l'obiettivo è quello di trovare il punto di equilibrio ottimo tra la prestazione richiesta dall'utente finale e la classe del satellite, guardando con un occhio di riguardo alla qualità dell'immagine e alle prestazioni operative. La sfida tecnologica in questo senso si sviluppa su diversi assi:

- **L'evoluzione delle antenne**, con l'obiettivo di una massa che non ecceda il 15% di quella dell'intero satellite, pur assicurando un'area efficace ed una direttività opportuna (nel caso in cui la banda del segnale da trasmettere lo consenta, l'uso di reflectarray e tessuti a membrana sembra essere una delle soluzioni più promettenti per indirizzare questo tipo di esigenza).
- **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 la realizzazione di costellazioni estese.
- **L'evoluzione dell'efficienza** dei pannelli solari e delle batterie a supporto del sistema di potenza di satellite.
- **L'evoluzione dell'elettronica** di strumento ed in particolare:
  - L'utilizzo di ADC e di Field Programmabile Gate Array (FPGA) di futura generazione, con capacità e velocità di calcolo adeguate a garantire un adeguamento della risoluzione ai sistemi ad altissima risoluzione.
  - L'utilizzo della tecnologia fotonica per la realizzazione di strumenti SAR multibanda compatti e per la distribuzione interna al radar dei vari segnali di antenna.

- La realizzazione di Transmit-Receive Module (TRM) on chip per la realizzazione di elevata flessibilità nella gestione del fascio di antenna.
- La valutazione di strategie opportune per un utilizzo ottimale di componentistica Hi-Rel (COTS) opportunamente testata e validata.

Nel campo delle applicazioni di *Image Intelligence* (IMINT), si guarda con interesse alla possibilità impiegare i satelliti radar per realizzare capacità di *Ground Moving Target Detection, Identification and Recognition*, estendendo anche allo spazio paradigmi già provati con successo in ambito avionico. La possibilità di implementare queste tecniche può essere indirizzata sviluppando concetti di strumento definiti ad hoc, oppure elaborando immagini SAR realizzate da satelliti non necessariamente progettati per questo scopo specifico.

In generale, le soluzioni di bordo realizzate per rivelare oggetti in movimento si fondano sulla possibilità di disporre di diversi canali di acquisizione dell'eco, così da poter enfatizzare le differenze delle proprietà del segnale indotte dal moto del target. In alternativa, la diversità di osservazione necessaria ad evidenziare gli effetti del moto può essere ottenuta grazie a passaggi successivi del satellite sulla stessa area di interesse o, a livello di costellazione, grazie alle osservazioni fatte da satelliti diversi in tempi diversi.

Per quel che riguarda le tecniche di elaborazione che si possono applicare sul dato, si può citare l'esempio della *Quadratic Phase Compensation*, che consiste di fatto in un secondo livello di elaborazione del dato SAR, "dedicato" agli oggetti in movimento.

La disponibilità di missioni satellitari SAR in diverse bande (X, C ed L), nonché di sensori per radar *imaging* da aereo (in banda P, ad esempio), apre il campo all'analisi combinata multi-banda dei dati di eco, con la possibilità di sfruttare le diverse caratteristiche di interazione tra segnale e target tipiche delle diverse porzioni dello spettro delle micro-onde (si pensi, ad esempio, alle diverse capacità di

penetrazione delle differenti frequenze e, più in generale, alle diverse proprietà di scattering nella varie bande), allo scopo di estrarre molteplici livelli di informazione dalla scena.

Le potenzialità di questo tipo di approccio risultano essere ulteriormente espanse nel caso in cui il dato SAR venga "fuso" con dati acquisiti da sensori di altra natura. Per le applicazioni di IMINT, ad esempio, l'impiego dei dati ottici ad altissima risoluzione (*Very High Resolution, VHR*) è di fondamentale importanza per creare un riferimento base per il riconoscimento dei target, mentre il dato SAR può essere sfruttato per effettuare analisi dinamiche, che evidenzino tracce di attività in uno scenario di interesse, anche nel caso in cui le condizioni di osservazione diventino proibitive per il sensore ottico.

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 SAR.

Un campo applicativo di grande interesse per i satelliti SAR è quello della misura delle deformazioni del terreno e delle infrastrutture, ottenibile grazie alle tecniche interferometriche. Questo tipo di misura può realizzarsi tramite un unico satellite SAR, che guardi alla scena attraverso ad una coppia di antenne separate da una certa distanza (la cosiddetta baseline interferometrica), ma più spesso la misura interferometrica è ottenuta andando ad elaborare il dato acquisito dallo stesso satellite in tempi diversi sull'area di interesse o impiegando una coppia di satelliti in formazione, che acquisiscano l'eco radar di una stessa scena, trovandosi ad una certa distanza relativa tra loro. A seconda della particolare geometria di acquisizione impiegata, le tecniche interferometriche consentiranno di realizzare misure di topografia piuttosto che di velocità, arricchendo il livello di informazione che può essere estratto da un'immagine radar.

Dal punto di vista delle soluzioni ingegneristiche impiegate, è interessante notare che, allo scopo di realizzare misure interferometriche in tempo reale, superando i vincoli di distanza realizzabili a livello di singolo satellite, è sempre più diffusa la tendenza di accompagnare satelliti SAR con dei *companion*, ovvero dei satelliti più piccoli, spesso solo riceventi, che servano appunto ad acquisire questo tipo di dato, con una convenienza economica importante rispetto al caso in cui si operi con una formazione di satelliti dello stesso tipo del *master*. Come esempio di questo tipo di approccio, possiamo citare la missione ESA di Harmony, che porterà due satelliti radar passivi ad affiancare uno dei satelliti Sentinel-1 di Copernicus, sfruttando quest'ultimo come illuminatore di opportunità e realizzando capacità di osservazione innovative, per il monitoraggio delle correnti marine e dei ghiacci.

Per finire, tra i concetti di misura radar proposti per monitorare dallo spazio i fenomeni di deformazione della superficie terrestre e le dinamiche del terreno e dei mari, va ricordato il concetto del SAR GEO che, sfruttando le anomalie di un'orbita geosincrona, consente di acquisire dati SAR su una certa zona di interesse, osservata in modo persistente. Questa soluzione si dimostra complementare rispetto al SAR LEO e, tramite un unico satellite, consente di garantire tempi di osservazione difficilmente raggiungibili da una costellazione, anche molto popolata, di satelliti che operino in orbita bassa.

MOTIVAZIONE PER LO SVILUPPO

Negli ultimi anni, si è fatta sempre più pressante l'esigenza di associare lo sviluppo tecnologico – di cui lo spazio è fattore trainante – con un ritorno applicativo concreto, che abbia ricadute importanti e certe, a beneficio della vita quotidiana di tutti.

Gli esempi di soluzione radar che abbiamo introdotto sopra vanno letti proprio nell'ottica di lasciare intravedere un legame diretto tra le soluzioni tecniche più promettenti e le aree applicative di maggior interesse.

L'impiego di sistemi radar ad alta risoluzione supporta le attività di *Intelligence* e Sorveglianza del Territorio, garantendo, in tempi brevi e su vasta scala, infor

mazioni sensibili e di vitale importanza, in caso di conflitti o di eventi naturali catastrofici, per un coordinamento efficace delle operazioni in zone di crisi. In particolare, l'elevata risoluzione è un parametro chiave per approcciare concetti di identificazione e di classificazione dei target, per poter determinare la classe di appartenenza e le dimensioni degli oggetti che popolano la scena.
Lo sviluppo di satelliti SAR di costo ridotto, che abbiano ingombri e masse contenuti, per poter essere stivati in piccoli lanciatori o per supportare lanci multipli, e prestazioni adeguate per consentire le applicazioni di interesse, rappresenta una soluzione vincente e di sicuro valore strategico per rispondere efficacemente alla domanda sempre più pressante di stati emergenti, in Asia, in Medio-Oriente e nel Sud America, che vogliano dotarsi di sistemi satellitari per il Monitoraggio Ambientale e per la gestione della Sicurezza del Territorio, nonché per aprirsi prospettive in un settore che appare sempre più promettente anche dal punto di vista industriale ed economico.
La specificità della configurazione di tipo SAR GEO porta ad ottenere risoluzioni più modeste di quelle ottenibili da orbita LEO ma ha il vantaggio di consentire il monitoraggio continuo di una certa area di interesse, rilevando anche le più piccole variazioni nelle caratteristiche della scena osservata (*Change Detection*) e fornendo prodotti di osservazione che si rivelano estremamente utili per applicazioni di monitoraggio ambientale.

Andando oltre allo scenario prefigurato sopra, che guarda ai domini più tradizionali dell'osservazione radar, è giusto considerare che il rapido progresso tecnologico e la spinta ad un impiego sempre più estensivo dello spazio, sia per fini geo-politici sia per interessi commerciali, stanno aprendo lo strada a nuove soluzioni. Queste soluzioni da un lato contribuiscono a diversificare ed arricchire l'offerta di proposte nel campo dell'Osservazione della Terra ma dall'altro vanno anche ad impiegare le potenzialità offerte dalla tecnologia radar per aiutare una gestione sostenibile e sicura dell'ecosistema spaziale. Come esempio di queste nuove opportunità, possiamo citare l'esempio della banda Ka che, penalizzata

dalle forti perdite di propagazione in atmosfera, stenta ad imporsi come soluzione per realizzare strumenti SAR destinati all'Osservazione della Terra ma che rappresenta altresì una scelta ottima per realizzare radar spaziali concepiti per applicazioni di *Space Situational Awareness* (SSA) e di *Protezione degli Asset Spaziali* (PSA) o per sensori radar Doppler a supporto di moduli d'atterraggio per l'esplorazione dei pianeti.

Detto dell'evoluzione delle soluzioni di bordo (*upstream*) e del loro legame con le applicazioni, notiamo anche che è evidente che il dispiegamento di soluzioni satellitari orientate all'utente, focalizzate all'utilizzo operativo esteso dei dati acquisiti, faccia poi da volano allo sviluppo del *data processing* e del *data exploitation*. Pertanto, l'evoluzione delle tecnologie a supporto delle soluzioni di bordo dovrà essere costantemente affiancata dagli sviluppi a livello di applicazioni e servizi (*down-stream*), essendoci sempre un ampio spazio di ricerca per cercare di trarre il massimo vantaggio dai dati di osservazione.

STATO DELL'ARTE

Ad oggi, i sistemi SAR per l'Osservazione della Terra con capacità di risoluzione sub-metrica rappresentano lo stato dell'arte in USA e in Europa, dove l'Italia e la Germania giocano un ruolo da protagonisti, mentre l'industria asiatica (la Corea del Sud, su tutti) sta lavorando per dotarsi delle tecnologie abilitanti necessarie per realizzare questi sistemi, forte dell'esperienza acquisita nell'ambito delle Telecomunicazioni e grazie a programmi spaziali per l'Osservazione della Terra, condotti in collaborazione con partner stranieri.

Affianco a questi sistemi, va segnalata l'importanza che sta assumendo il comparto spazio basato sui piccoli satelliti, citando ad esempio la missione IRIDE, finanziata dal Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), che porterà l'Italia a dotarsi di un'importante infrastruttura per l'Osservazione della Terra ed a sviluppare applicazioni e servizi di primario interesse per il cittadino.

Più in generale, guardando anche al futuro impiego di radar spaziali per il supporto ad applicazioni di SSA e PSA, notiamo che lo scenario che si prospetta è estremamente stimolante e vi sono tutti i presupposti affinché questi strumenti possano presto affiancarsi ai sensori che operano da terra, per rendere sempre più sicure le operazioni di tutti gli *asset* spaziali.

In sintesi, possiamo dire che, grazie al patrimonio di competenze acquisito in anni di esperienza nella progettazione, nello sviluppo e nella messa in opera di missioni spaziali, la filiera industriale italiana condotta da Thales Alenia Space in Italia S.p.A le soluzioni innovative per la sorveglianza ed il monitoraggio su larga scala trovano l'industria italiana pronta per le sfide internazionali, sia nel mercato istituzionale Europeo, sia nel mercato commerciale.

Questa specifica evoluzione si accompagna all'esigenza di sviluppare capacità produttive ad alto "*rate*", cioè in tempi di un ordine di grandezza inferiore al recente passato, avvicinando il mercato spaziale alla produzione di serie. È evidente che questo cambio di paradigma deve portare con sé l'adattamento dei processi produttivi, virando decisamente verso la realizzazione di fabbriche digitalizzate in cui la "*augmented reality*" sia al servizio della produzione e della verifica dei sistemi satellitari a terra. La profonda trasformazione che ne consegue deve riguardare anche la revisione accurata delle lesson learnt e dei margini tecnici consentendo all'Italia il mantenimento della *leadership* nel settore.

Dal punto di vista delle tecnologie di base necessarie a supportare lo sviluppo di queste soluzioni, citiamo i dispositivi GaN-HEMT che, al crescere della frequenza fino alla regione delle microonde e delle onde millimetriche, presentano prestazioni estremamente vantaggiose 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. Grazie a tali caratteristiche i circuiti integrati su GaN/SiC offrono potenzialmente considerevoli vantaggi nelle applicazioni satellitari in cui sia richiesta

una elevata potenza trasmessa, associata ad un alto grado di riconfigurabilità delle antenne di bordo.
Infine, parlando dei materiali e dei processi realizzativi richiesti per costruire e qualificare questi dispositivi, si nota che l'aumento della frequenza di esercizio richiede anche un continuo sviluppo dei processi tecnologici, con la progressiva riduzione delle dimensioni critiche dei dispositivi.

EDGE COMPUTING PER LO SPAZIO

Con Edge computing si intende in generale la capacità di offrire servizi digitali, direttamente dalle apparecchiature periferiche collegate ad un network dove è possibile individuare una infrastruttura centrale, tipicamente incarnata da un data centre contenente i server di controllo della rete stessa ed i server dai quali vengono erogati i servizi centrali.

Lo sviluppo dell'Edge computing lo si deve ad alcuni requisiti fondamentali di qualità del servizio, quali la latenza nella risposta (questo è il caso delle reti 5G e superiori), e la disponibilità di banda di trasmissione. Infatti, molte reti si sviluppano connettendo nodi periferici con funzionalità di raccolta dati, man mano che gli strumenti di raccolta dati evolvono, il volume di produzione dati cresce, così come cresce il numero di nodi, di modo che, il volume dati totale, in modello in cui l'elaborazione ed i servizi sono funzioni esclusive del data centre centrale, pone una pressione insostenibile alla banda di trasporto dati ed alla capacità di ingestione ed elaborazione del data centre centrale.

Con l'Edge computing invece si porta capacità di elaborazione e di offrire servizi nei nodi periferici, che raccolgono dati, cosicché i dati possono essere elaborati localmente (diminuendo la pressione sul data centre centrale), ed erogati direttamente all'utente (abbattendo la latenza).

Oltre a questo, l'Edge computing si sta anche affermando come indispensabile per rendere sempre più autonoma la gestione della rete stessa dall'intervento dell'uomo, questo grazie allo sviluppo di algoritmi di intelligenza artificiale (agenti) che hanno la capacità di gestire in autonomia apparati connettendosi alle interfacce di gestino degli stessi.

Infine, per mantenere comunque una coerenza complessiva della rete che vede al suo interno infrastrutture centrali e nodi periferici, è necessario implementare un paradigma di continuum digitale (digital continuum) in cui la parte centrale ed i nodi periferici condividono lo stesso "middleware" solitamente rappresentato da un software di cloud computing, di modo che i servizi possono essere spostati dal centro alla periferia e viceversa a seconda delle condizioni di carico ed al fine di rispettare vincoli di qualità del servizio ed affidabilità (ad esempio se un nodo crolla è necessario che possa subentrare un altro nodo o l'infrastruttura centrale per non interrompere l'erogazione del servizio).

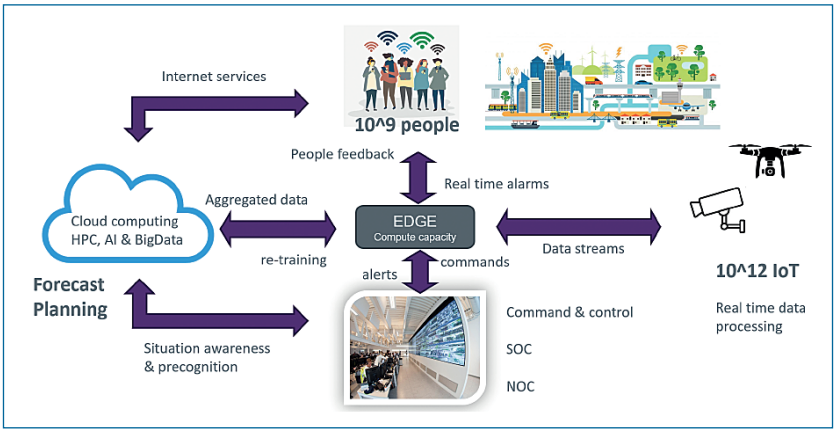


Figura 1: Rappresentazione della centralità dell'Edge Computing nelle Smart Cities per il processing real-time dei dati delle Internet of Thing e dei servizi alle persone (Fonte: Leonardo)

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Con lo sviluppo della Space Economy che porterà ad un aumento significativo dei satelliti in orbita con nuovi e sempre più sofisticati strumenti, i problemi che abbiamo evidenziato sopra a proposito delle reti digitali terrestri, si pongono anche per la rete di raccolta dati satellitare.

Dunque, la necessità di sviluppare un sistema di Edge computing per lo spazio, in cui parte della capacità elaborativa viene spostata a bordo del satellite per effettuare in situ elaborazioni complesse e ridurre il trasferimento di dati a terra (idealmente vorrei trasferire a terra solo l'informazione cercata, non il dato grezzo), per abbattere le latenze di risposta e decongestionare la banda di trasmissione verso terra. Inoltre l'Edge computing a bordo satellite abilita un accesso ubiquo all'informazione (non c'è la necessità di far arrivare il dato nel centro elaborazione di terra ma posso offrirlo direttamente all'utente indipendentemente dalla posizione dello stesso, sfruttando la network spaziale costituita dai nodi Edge , integrati in una cloud spaziale); ancora, questa capacità abilita anche una maggiore autonomia del satellite stesso, sul quale possono essere spostate anche funzione di controllo e gestione dello stesso, agite per mezzo di algoritmi di intelligenza artificiale.

Nello spazio il digital continuum si può realizzare sviluppando un "middleware" mutato da quello terrestre, per istanziare un cloud che integri i nodi Edge (tipicamente satelliti con strumenti) con altri che hanno invece possono essere dedicati ad offrire capacità di elaborazione superiore o di archiviazione dei dati stessi.
Potendo disporre di una cloud spaziale in grado di erogare servizi direttamente all'utente finale, dotato di opportuni terminali, oppure facendo leva su servizi internet spazializzati (ad esempio starlink), è possibile abbattere le latenze ed avvicinarsi sempre più a servizi quasi real time.
L'Edge computing a bordo satellite unito ad un servizio di cloud computing spaziale potrà portare a sviluppare nuovi servizi e mercati (così come accade sulla terra), ad esempio ospitare dinamicamente applicazioni sviluppate dall'utente, che può acquistare tempo calcolo e accesso ai dati e pagare solo per la frazione di tempo, risorse e dati utilizzata (pay as you go); moltiplicando così il valore del satellite.

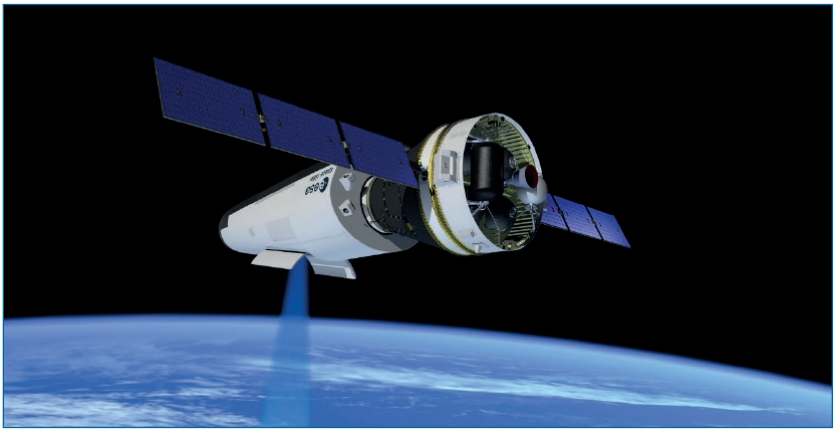


Figura 2: Layout artistico del concept di SPACE RIDER (Fonte: ESA)

STATO DELL'ARTE

L'Edge computing sulla superficie terrestre è una tecnologia giovane ma ormai consolidata, nello spazio questa non è ancora implementata in modo completo

da nessun servizio, in quanto la capacità di processing a bordo fino ad oggi era estremamente limitata. Esistono però alcuni progetti in corso ed alcune tecnologie computazionali che potranno essere utilizzate nel giro di pochi anni per implementare un sistema Cloud Edge spaziale. Vi sono satelliti modulari di nuova generazione, nodi di calcolo per lo spazio con caratteristiche HPC, e soluzioni di storage distribuito che possono essere adattate per supportare un Edge spaziale. In particolare, in Italia esiste una SME, CUBBIT, che sviluppa una soluzione di storage distribuito per sistemi Edge , che si sposa perfettamente con una soluzione Cloud Edge spaziale.
Cubbit è una tecnologia unica che permette di realizzare reti di salvataggio dati con funzionalità computazionali integrate, perfetto per ambienti dove:

- la disponibilità di risorse è limitata e preziosa
- i collegamenti possono essere limitati e con difficoltà di connessione e banda
- ambienti altamente instabili o in condizioni ostili da un punto di vista di accessibilità all'hardware
- la sicurezza e il controllo sui dati e i workflow sono primari.

In quest'ottica, la tecnologia geo-distribuita di Cubbit rappresenta una valida opzione per creare una piattaforma di storage (e computing) integrata all'interno di un sistema di satelliti in orbita.

L'architettura della piattaforma di gestione dati è **distribuita** e **disaggregata**. Inoltre, è caratterizzata da componenti che utilizzano poche risorse per funzionare. Il dato può essere salvato su una cache locale dopo essere stato cifrato per poi essere diviso in segmenti che vengono aumentati per ridondanza e distribuiti in una rete che, in questo caso, può essere formata da un vasto numero di satelliti.

Una rete così composta risulta estremamente **sicura** e **resiliente**. Infatti:

1 Anche se uno o più satelliti dovessero soffrire un malfunzionamento, il dato sarebbe comunque protetto ed accessibile dagli altri satelliti e da siti terrestri che hanno visibilità dei satelliti in orbita

2 Grazie a come il dato può essere distribuito fra i diversi satelliti non è necessario avere la visibilità di tutti i nodi della rete (satelliti) per poter recuperare il dato, ma solo di una porzione di essi decisa a priori dall'utente

3 Il dato rimane accessibile ma protetto anche in caso di eventuali attacchi hacker. Infatti la compromissione di uno o più satelliti non comporta la perdita del dato

4 Un eventuale accesso indesiderato difficilmente può risultare in una violazione del dato proprio perché ogni elemento della rete salva solo **segmenti cifrati** del dell'informazione e non consente la ricostruzione dell'intero dato partendo da un singolo segmento.

Oltre allo strato per il salvataggio dei dati, Cubbit sta sviluppando un **serverless framework** per il quale ogni operazione a livello di storage crea un evento che può essere intercettato e che può far scattare l'esecuzione di una **funzione software**. In questo modo il dato può essere elaborato direttamente **mentre viene ingerito dal sistema**, con latenza bassissima e con un uso di risorse minimo. Questa tecnica computazionale può essere utile per eseguire una prima analisi sul dato, validarlo, aumentare i metadati, filtrare o migliorare il dato stesso e tanto altro ancora.

Cubbit è una tecnologia unica che permette di realizzare ambienti di salvataggio dati con funzionalità computazionali integrate, perfetto per ambienti dove la disponibilità di risorse è limitata e preziosa mentre i collegamenti possono essere limitati e con scarsezza di banda.
Per quanto riguarda invece lo sviluppo di nodi di calcolo ad elevata capacità prestazionale e relativo stack Cloud, UNIBAP risulta essere una delle aziende più interessanti e all'avanguardia in Europa e nel mondo. Fondata nel 2013 e basata in Svezia, UNIBAP offre svariate soluzioni stato dell'arte omnicomprensive che includono hardware, software e servizi, con prodotti a TRL elevato già sperimentati in volo e diverse missioni all'attivo; tali soluzioni contengono i building block principali per nodi HPC all'Edge nello Spazio, tra i quali:

- CPU multi-core embedded per general purpose computing;
- GPU integrate con CPU (architetture APU) per operazioni di preprocessing;
- VPU o acceleratori dedicati per task di inferenza AI;
- FPGA per acquisizioni dati;
- Capacità di RAM e storage avanzate.

Tali componenti per questa prima generazione di prodotti sono scelti accuratamente tenendo in conto i vincoli di dimensioni, peso e consumo energetico presenti nell'ambiente spaziale. Le soluzioni, inoltre, supportano sistemi operativi Linux e tutto l'ecosistema software associato, sia lato deployment di applicazioni AI che lato deployment di servizi containerizzati, anche tramite sviluppi software custom proprietari.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

Per quanto attiene alle risorse economiche necessarie allo sviluppo di una infrastruttura Edge computing nello spazio, si debbono considerare i seguenti elementi costitutivi:

- Hardware e software di sistema dei computer Edge che andranno a bordo satellite;
- Adeguamento dell'architettura del satellite per ospitare il payload di calcolo;
- Adeguamento del sottosistema di comunicazione satellite-satellite e satellite-terra;
- Adeguamento del software di Cloud Computing per la gestione del continuum Edge -Cloud;
- Adeguamento del software per la gestione distribuita dei dati;

Implementazione di un nodo di controllo terrestre che integri un Datalake per il consolidamento e archiviazione dei dati raccolti all'Edge , nonché di un sistema di processamento dati del tipo High Performance Computing per poter sia eseguire algoritmi di intelligenza artificiale su dati storici, sia allenare i modelli di intelligenza artificiale da portare sui satelliti nei sistemi Edge ;

- Studio e progettazione di tutto il sistema.

Considerando gli elementi di cui sopra, è possibile fornire una stima delle risorse economiche necessarie. Per la fase di progettazione è possibile ipotizzare circa 3M€; per lo sviluppo e l'adeguamento del nodo Edge e dei sistemi di bordo 5M€; per gli adeguamenti del software per il cloud – Edge continuum circa altri 5M€; per la piattaforma di controllo terrestre, dotata di Datalake e sistemi di Intelligenza Artificiale, circa 10M€. Ne consegue che per abilitare un sistema Edge per lo spazio potrebbero servire indicativamente 25M€ di costi di sviluppo. Oltre a tali costi, bisognerà successivamente considerare i costi operativi e di realizzo per ciascun satellite dotato di questa tecnologia, che possiamo stimare in circa 1M€ per satellite per una vita operativa di 5 anni.



Figura 3: Edge Computing nello Spazio intorno alla Terra, alla Luna e a Marte (Fonte: Leonardo, Telespazio e Thales Alenia Space)

TRATTAMENTO DI IMMAGINI RADAR E DI DATI/SEGNALI BASATE SU INTELLIGENZA ARTIFICIALE SPAZIALI

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. Infatti, mentre i sensori ottici sono suscettibili alle limitazioni poste dalla copertura nuvolosa, dall'oscurità e in genere dalla visibilità e dalle condizioni luminose, il SAR offre funzionalità senza precedenti, tra cui l'acquisizione in tutte le condizioni atmosferiche, sia diurne che notturne, rendendolo indispensabile per le applicazioni che richiedono monitoraggio continuo e risposta rapida, come ad esempio la gestione dei disastri e la sorveglianza marittima. Nonostante il potenziale del SAR, tale tecnologia rimane un ambito sotto-esplorato in termini di implementazione dell'intelligenza di bordo. Una delle maggiori complessità deriva dalle caratteristiche intrinseche del dato SAR. Infatti, il SAR (satellitare) è una tecnica di telerilevamento utilizzata per creare immagini a partire da segnali RADAR ad alta frequenza emessi nella direzione di una specifica regione della superficie terrestre al fine di rilevarne le proprietà fisiche. Un sistema con tale tecnologia può generalmente effettuare acquisizioni in diverse modalità scelte in funzione dall'applicazione, dalla copertura desiderata e della necessaria risoluzione. Anche se tecnicamente tutte le modalità di acquisizione possono essere utilizzate ovunque, alcune modalità sono specifiche per applicazioni oceaniche diverse da quelle utilizzate nelle applicazioni terrestri. Le diverse modalità di acquisizione possono essere definite sia dalla loro forma geometrica (correlata alla configurazione geometrica dell'antenna SAR) o da proprietà temporali.

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 capa

cità 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. Questo rende le immagini radar di non facile interpretazione e spesso richiede la figura di operatori specifici come i foto-interpreti.

Gli algoritmi di AI, applicati a questo tipo di dato, giocano un ruolo chiave nell'analisi di carattere geospaziale per riconoscere ed analizzare sia informazioni direttamente estraibili dai dati che correlazioni nascoste 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, le 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;
- a 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);
- a capacità di elaborazione anche di dati eterogenei generati da altre sorgenti e sensori, come le immagini satellitari ottiche, i dati AIS (Automatic Identification System) per la sorveglianza marittima e gli open data.

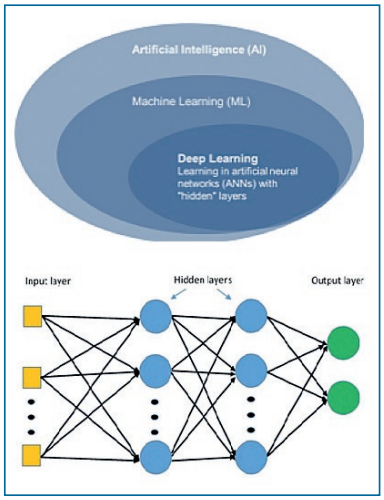


Figura 1: Relazione tra le tipologie di algoritmi AI ed esempio di MLP (Fonte: Thales Alenia Space)

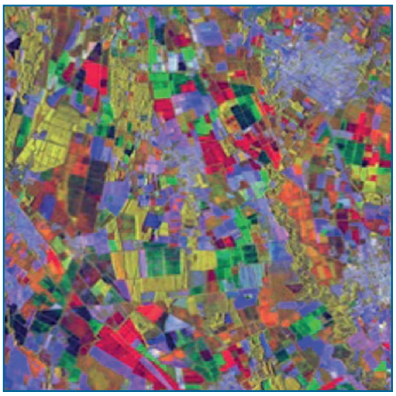


Figura 2: Classificazione di un'immagine radar (campo agricolo) tramite AI (Fonte: Thales Alenia Space)

Per raggiungere tali obiettivi, è necessario lo studio e lo sviluppo di metodologie ed algoritmi basati su AI per l'elaborazione e classificazione di dati SAR. 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);
- Multilayer Perceptron Neural Network (MLP);
- Recursive Neural Network (RNN);
- Reti Neurali Generative.

La scelta dell'algoritmo e la definizione del modello di rete neurale dipendono 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 giornalmente 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. Inoltre, nel domino dell'osservazione della Terra, la richiesta di capacità decisionali in tempo reale, unita alla necessità di ottimizzare l'acquisizione, il processing e la trasmissione dei dati, ha portato a un notevole interesse nella ricerca e sviluppo di nuovi approcci e delle tecnologie da utilizzare nelle future missioni spaziali.
In particolare, lo spostamento delle attuali tecnologie dalle strutture di terra (Ground Segment - GS) verso il satellite sta delineando un nuovo futuro per le missioni spaziali con delle nuove funzionalità e applicazioni sia downstream che upstream. Difatti possiamo considerare il settore spaziale diviso essenzialmente in queste due categorie, dove il settore upstream comprende il trasporto di oggetti nello spazio, le stazioni terrestri e l'esplorazione spaziale, mentre il settore downstream si riferisce a dati e servizi derivanti dall'upstream, principalmente dai satelliti. Un gran numero di applicazioni è parte quindi del settore downstream che si arricchisce nel tempo in maniera esponenziale di nuove funzionalità grazie alle tecnologie innovative introdotte. Pertanto, oltre al segmento di terra anche la componente di segmento spaziale delle costellazioni di satelliti SAR per l'osservazione della Terra sta evolvendo al fine di ottenere il massimo utilizzo delle nuove tecnologie disruptive.

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 di interesse spaziale d'uso sono:

- identificazione e riconoscimento di oggetti di interesse in immagini satellitari per il monitoraggio di infrastrutture critiche o per la sorveglianza marittima;
- identificazione e riconoscimento di oggetti in immagini o video a supporto di strumenti investigativi delle forze di polizia;
- Analisi delle missioni spaziali tramite chatbot.

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 energetiche, 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 e 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

Intelligenza artificiale per il processing di segnali

L'utilizzo di modelli ed algoritmi di Intelligenza Artificiale nel panorama delle tecnologie nei sistemi spaziali riguarda vari campi applicativi per l'elaborazione di dati e segnali generati dai sistemi satellitari, come il trattamento di dati SAR nei sistemi di osservazione della Terra, come descritto nelle sezioni precedenti.

Inoltre, le tecnologie AI trovano impiego anche in altri ambiti, come ad esempio l'analisi di dati HKTM generati a bordo del satellite nel contesto di applicazioni di *Spacecraft Health Monitoring* (HM), per la manutenzione predittiva e l'analisi delle condizioni operative del satellite (stima della *Remaining Useful Life, o RUL*). Queste funzioni sono di fondamentale importanza per garantire la disponibilità, affidabilità e sicurezza del veicolo spaziale.

Infatti, come noto, i sistemi spaziali sono progettati per soddisfare le esigenze dell'utente, i requisiti funzionali e prestazionali, i vincoli operativi, in particolare in relazione all'ambiente spaziale nel quale devono operare (LEO, MEO, GEO), al tipo di missione da svolgere, al livello di autonomia e complessità delle operazioni richieste nel corso della vita operativa. A questo scopo, il satellite è costituito da unità ed equipaggiamenti tra loro integrati che svolgono le varie funzioni richieste, come ad esempio l'elaborazione di segnali e dati, il monitoraggio e controllo, la comunicazione delle informazioni (sia all'interno del satellite che verso il segmento di terra), il data handling, l'acquisizione di dati tramite sensori (carico utile), il controllo di assetto del satellite, ecc. Tali elementi a bordo del satellite generano dati telemetrici (o telemetrie) necessarie a monitorare lo stato di salute del veicolo spaziale, ad individuare precocemente eventuali fenomeni / eventi anomali, e gestire possibili malfunzionamenti. Le funzioni denominate FDIR (Fault Detection, Isolation and Recovery) svolgono un ruolo fondamentale per la gestione dell'asset spaziale, e sono un insieme di procedure implementate all'interno del sistema per rilevare, isolare e ripristinare eventuali guasti o anomalie che si verificano durante il funzionamento del sistema.

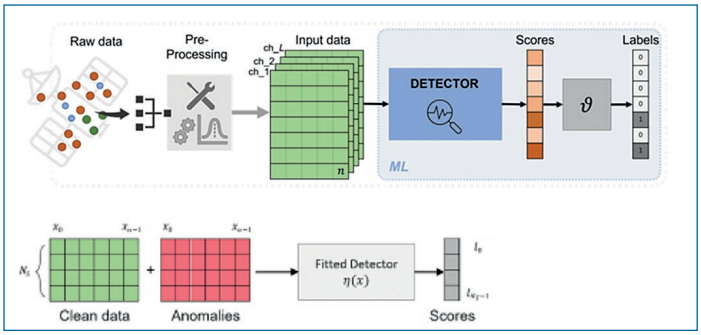


Figura 3: Esempio di pipeline di Machine Learning per un sistema di anomaly detection su telemetrie (Fonte: Thales Alenia Space)

Classicamente le funzioni di FDIR sono gestite attraverso tecniche cosiddette OOL (Out of Limits) e la definizione di valori di soglia nominali per i parametri di telemetria. In questo modo, quando i valori dei parametri superano i valori di soglia, il sistema FDIR genera dei segnali di allarme automatici a cui segue un iter di verifica dell'anomalia ed eventuali azioni di ripristino in funzione dell'architettura del sistema (ridondanze, ecc.). Normalmente questo task richiede l'intervento degli operatori del centro controllo satellite, che riceve i dati telemetrici tramite il link di comunicazione TM/TC. L'analisi dei dati telemetrici e delle informazioni generate dal sistema FDIR è eseguita sostanzialmente dall'operatore del centro di controllo con strumenti manuali e semi-automatici, e ciò rappresenta spesso un compito dispendioso in termini di tempo e richiede conoscenze specifiche di dominio. Questo aspetto è ancor più rilevante in caso di gestione di satelliti in costellazione.

In questo contesto, l'introduzione di strumenti software avanzati basati su modelli ed algoritmi di Intelligenza Artificiale a supporto delle funzioni di Health Monitoring e FDIR in un sistema spaziale è motivata dal fatto che tali tecnologie hanno ampiamente mostrato la capacità di elaborare efficacemente grandi moli di dati, in particolare le serie storiche rappresentate dai dati telemetrici (*time series*), per

varie applicazioni quali ad esempio la ricerca di pattern anomali (*anomaly detection*), analisi predittiva (*predictive analytics*), analisi di correlazione, ricerca delle relazioni di causa-effetto tra serie storiche (o analisi delle associazioni causali), ecc. Gli algoritmi di Machine Learning sono opportunamente progettati, sviluppati ed integrati all'interno di catene di elaborazione dati (data processing workflow), in grado di estrarre informazioni utili sul contenuto e comportamento dei segnali di telemetria (knowledge retrieval) a supporto delle operazioni del segmento spaziale. La Figura 3 mostra un esempio di pipeline di calcolo. Tali metodologie costituiscono un valido strumento di analisi complementare alle tecniche OOL attualmente impiegate, e consentono di incrementare l'efficienza dei processi di analisi e di decisione dell'operatore.

Gli algoritmi che impiegano tecnologie di AI applicabili alle telemetrie satellitari sono di varia natura, a seconda della tipologia di informazione che si vuole ottenere e sono verificati su dataset opportunamente predisposti. I più utilizzati sono: AutoEncoder (AE), Principal Component Analysis (PCA), Generative Adversarial Networks (GANs), Long Short Term Memory (LSTM), Recurrent Neural Network (RNN), Support Vector Machine (SVM).

Le applicazioni

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 e dai satelliti in orbita. Il valore aggiunto di questo processo in atto a livello di upstream 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).

Il processing dei segnali telemetrici, dall'altra parte, trova contestualmente applicazione in vari casi d'uso, quali:

- rilevamento di anomalie;
- stima della vita utile residua (RUL, come già descritto);
- diagnosi e troubleshooting: con l'analisi dei dati e l'uso di algoritmi di apprendimento automatico, è possibile effettuare diagnosi più accurate, velocizzando e facilitando i processi di misure correttive;
- ottimizzazione delle risorse on-board;
- verifica della salute e sicurezza dell'equipaggio;

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.
Con i crescenti investimenti nelle tecnologie dell'IA e l'aumento dell'interazione digitale, il mercato globale dell'IA ha raggiunto un valore di 136,55 miliardi di dollari nel 2022 e si prevede una crescita straordinaria nel prossimo decennio. Nella corsa globale per il dominio dell'IA, gli Stati Uniti vantano un vantaggio storico rispetto alla Cina con l'India, il Regno Unito e il Giappone che emergono come contendenti. Da un'analisi globale emerge che c'è un'alta concentrazione di ricerca e sviluppo nell'AI in Europa con un alto numero di papers nell'AI con il 28% di tutte le pubblicazioni sull'argomento, Questi dati indicano un forte interesse e la crescita della ricerca in questo specifico settore della Digital Trasformation.

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 e VPU on board per soluzioni AI –based. 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.

Seguendo questo approccio Thales Alenia Space, come molte aziende operanti nel settore spaziale, sta prototipando, testando e sviluppando soluzioni tecnologiche per i futuri sistemi spaziali: ciò è possibile grazie a team specializzati che si avvalgono di laboratori specifici equipaggiati con modelli HW\SW rappresentativi dei satelliti

GUIDA E NAVIGAZIONE SATELLITARE

GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS (GNSS)

Negli ultimi anni la navigazione satellitare ha penetrato il mercato civile, governativo e militare a tal punto che alcune applicazioni ormai di uso quotidiano sono dipendenti dalla disponibilità dei sistemi **GNSS** (*Global Navigation Satellite Systems*). Dalla messa in orbita del solo sistema americano **GPS** (*Global Positioning System*), oggi si contano altre tre costellazioni globali (GLONASS, Russia, Beidou, cinese, e **Galileo**, europea) e due regionali (QZSS, giapponese, e IRNSS, indiana). Questi sistemi contano sulla crescente richiesta di nuovi e più sofisticati servizi di **PNT** (Posizione, Navigazione e Tempo) con prestazioni sempre più elevate in termini di accuratezza e disponibilità. La possibilità di offrire servizi con una copertura globale rende i sistemi GNSS la più importante sorgente di PNT al momento disponibile.

Il concetto alla base del GNSS si basa su una misura da parte dell'utente della propria distanza, o *pseudoranges*, da ognuno dei satelliti che orbitano intorno alla terra tramite segnali nella banda L riservata ad applicazioni di radionavigazione. Un segmento di terra esteso su tutto il globo è in grado di fornire in maniera estremamente precisa la posizione di ogni satellite: questo consente all'utente, insieme alle proprie misure di *pseudoranges,* di conoscere la propria posizione sulla terra. Essendo il tempo una variabile fondamentale perché regola il momento in cui la misura è stata effettuata con la posizione del satellite in quell'istante, l'utente può sincronizzarsi con il sistema in maniera molto precisa. Per questo motivo, il GNSS è una sorgente di informazione non solo di posizione ma anche di velocità e di tempo. Le informazioni inviate all'utente sono calcolate da un segmento di terra molto sofisticato che utilizza decine di antenne sparse intorno al globo con funzioni che vanno dalla comunicazione alla misura.

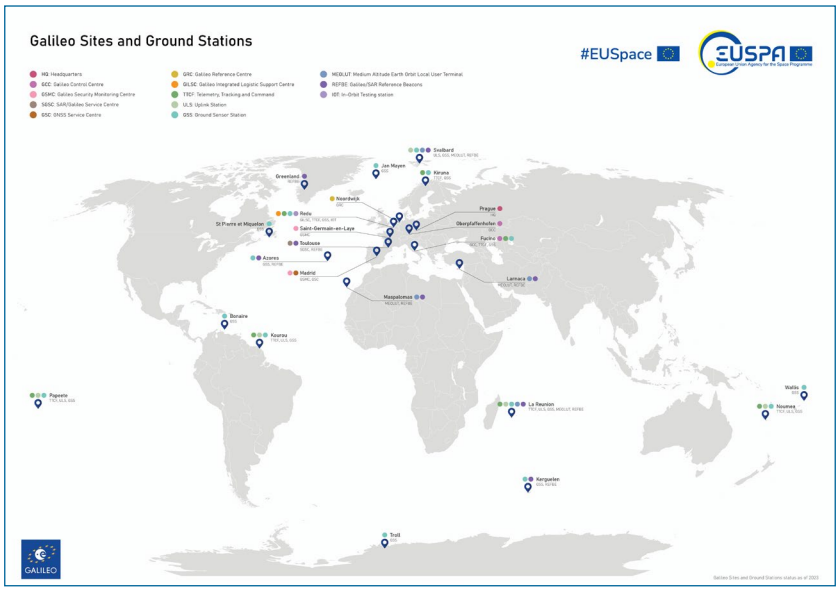


Figura 1: Segmento di terra del sistema Galileo (Fonte: EUSPA)

L'accuratezza delle misure è fortemente influenzata da alcuni fattori, tra cui:

- La radiazione termica o rumore bianco
- Errori sulla conoscenza dell'orbita dei satelliti
- Distorsioni nella catena di ricezione
- Precisione degli algoritmi
- Influenze atmosferiche, in particolare quelle ionosferiche che influenzano fortemente il segnale con ritardi difficilmente prevedibili

Il GNSS ha aumentato negli anni lo spettro di mercati che possono essere serviti tanto che l'Unione Europea, nella veste dell'Agenzia Europea per i Programmi Spaziali (**EUSPA**) ha identificato in totale 16 mercati che sono o saranno nel prossimo futuro supportati e abilitati dal GNSS:

	Agricoltura	Il GNSS può essere applicato all'agricoltura tradizionale, all'IoT (Internet-of-Things), alla blockchain, alla tecnologia agro-finanziaria e alla gestione della catena del valore. Il GNSS supporta le tecnologie wearable che mirano a migliorare la qualità della vita degli animali.
	Aviazione e droni	La navigazione satellitare consente di implementare procedure di avvicinamento con guida verticale (APV – Approach Procedure with Vertical guidance) con sempre più ridotto supporto dei sistemi terrestri e operatori, con miglioramenti nell'efficienza del traffico aereo e della sicurezza.
	Biodiversità, ecosistema e capitale naturale	I beacons GNSS vengono utilizzati per geo-localizzare gli animali allo scopo di monitorare migrazioni, habitat e comportamenti.
	Servizi climatici	Il GNSS supporta una serie di applicazioni geodetiche che misurano proprietà della Terra (campo magnetico, atmosfera) che hanno un impatto diretto sul clima terrestre
	Soluzioni per i consumatori, turismo e salute	Il GNSS penetra sempre di più le vite dei consumatori, dalle app che supportano l'erogazione di servizi sanitari, alle consegne via drone, alle app per il fitness fino ai semplici navigatori stradali e app per le visite guidate nei siti di interesse culturale
	Gestione delle emergenze e aiuti umanitari	Il nuovo sistema SAR (Search and Rescue) del programma COSPAS-SARSAT, basato sul GNSS, consente di localizzare utenti in emergenza (ad esempio in mezzo al mare) per poter intervenire in tempi rapidi per il salvataggio.
	Energia e materie prime	Le reti elettriche utilizzano in larga misura i servizi di sincronizzazione forniti dal GNSS per gestione e monitoraggio. Nel campo delle materie prime, il GNSS permette di monitorare la movimentazione delle merci e le ispezioni dei siti.
	Pesca e acquacoltura	Il GNSS viene utilizzato sia per il monitoraggio e la pianificazione delle attività di pesca con l'obiettivo sia di rispondere alla domanda sempre maggiore di cibo, pur assicurando la sostenibilità delle attività ittiche, sia di combattere la pesca di frodo.
	Foreste	Il GNSS viene utilizzat sia per la gestione forestale di precisione grazie ai servizi ad alta accuratezza sia per l'uso dei droni per il monitoraggio della salute delle aree forestali.
	Infrastrutture	Oltre ad assicurare servizi di sincronizzazione per la gestione delle infrastrutture, il GNSS abilita l'uso di reti di sensori e IoT per il monitoraggio infrastrutturale orientato alla riduzione degli incidenti e la continuità dei servizi cooperando con le reti cellulari ed il 5G.
	Assicurazioni e finanza	Il mondo della finanza si affida al GNSS per la sincronizzazione di precisione nelle transazioni finanziarie, mentre le assicurazioni usano il GNSS nelle semplici scatole nere per le assicurazioni auto o a bordo dei droni per la valutazione degli incidenti.
	Trasporto marittimo e fluviale	Il GNSS è uno strumento fondamentale per la navigazione sia in ambiente portuale che in mare aperto per consentire l'efficientamento delle rotte, aumentare la sicurezza della navigazione, monitorare il traffico navale e combattere la pirateria. Il GNSS avrà anche un ruolo fondamentale per abilitare nel prossimo futuro la navigazione autonoma.
	Ferroviario	Il GNSS viene usato per aumentare la sicurezza e l'efficienza delle reti ferroviarie, rafforzare le funzionalità di comando e controllo (ad esempio sincronizzando le operazioni) e complementare le tecnologie di terra.
	Automotive e strade	Il GNSS è ormai parte fondamentale della navigazione su strada. Oltre a supportare la navigazione dell'utente e proteggere dai furti, il GNSS è una tecnologia chiave che, insieme ad altre, abilita la guida autonoma.
	Spazio	Similmente alla navigazione terrestre, il GNSS supporta e supporterà sempre di più la navigazione in orbita di altri satelliti e apparati, grazie alle sue caratteristiche di robustezza e disponibilità che lo rendono più attraente rispetto ai sistemi di navigazione basati su antenne a terra.
	Sviluppo urbano e patrimonio cultural	Le soluzioni basate sul GNSS vengono utilizzate per rilevare e mappare con precisione le aree urbane e per costruire modelli 3D avanzati delle aree urbanizzate.

Tabella 1: Mercati verticali GNSS (adattato da EUSPA Market Report 2024)

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Il mondo PNT, come evidenziato dal Market Report dell'EUSPA del 2024, ha ricadute economiche notevoli nel mondo della manifattura ma soprattutto dei servizi.

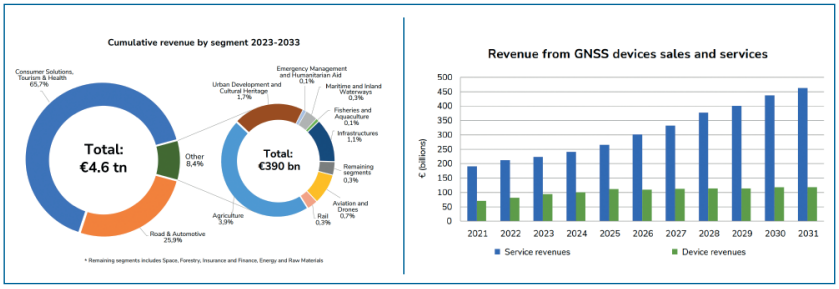


Figura 2: Rendite decennali cumulativa 2023-2033 divise per segmento di mercato e annuali per servizi e apparati (Fonte: EUSPA market report 2024)

Nonostante le tecnologie GNSS siano ormai abbastanza consolidate dato il loro utilizzo che risale all'inizio degli anni 80, l'aumento delle richieste di performance e l'apertura di nuovi mercati richiede continui miglioramenti sulla maggior parte delle figure di performance. Di queste, la vulnerabilità del GNSS è uno degli aspetti più critici in quanto può impattare negativamente la disponibilità, integrità e continuità del servizio e relative prestazioni.

Il mondo della ricerca ed industriale si sta concentrando su questo aspetto per consentire al GNSS di poter essere utilizzato e certificato per applicazioni *safety-critical* (un fallimento del sistema può creare problemi critici, come danni ad infrastrutture) o *safety-of-life* (un fallimento del sistema può arrecare danni anche letali alle persone). Ad esempio, a gennaio 2024 Galileo ha ricevuto la certificazione per poter essere utilizzato come sistema di assistenza al mondo dell'aviazione (dal decollo all'atterraggio), a complemento di EGNOS. Questo risultato, ottenuto a 13 anni dal lancio del primo satellite della costellazione, fa comprendere come sia critico questo aspetto del posizionamento satellitare. Nonostante questi sforzi, il 25 gennaio 2024, la FAA (*Federal Aviation Agency)*, che si occupa della regolamentazione dell'aviazione per gli operatori statunitensi, ha emesso un comunica-

to in cui avverte dei rischi degli attacchi ai sistemi GNSS, tanto da raccomandare agli operatori, ove disponibili, di "pianificare l'uso di sistemi di assistenza alla navigazione convenzionali (NAVAIDs)".
La resilienza del GNSS sta inoltre iniziando a permeare anche le applicazioni meno critiche. Molti use case, infatti, richiedono che il GNSS sia disponibile e affidabile, resistente ad attacchi di tipo jamming (interferenti intenzionali e non intenzionali) o più sofisticati come spoofing e meaconing. Insieme all'ibridizzazione, tecniche di protezione del segnale per aumentare la resilienza dei servizi di posizionamento e per il monitoraggio dello stato del GNSS e relative performances sono tra le innovazioni più importanti nel campo della navigazione satellitare.

STATO DELL'ARTE

A causa delle richieste sempre più spinte, i sistemi GNSS sono ad oggi affiancati da ulteriori sistemi, satellitari e no, che hanno lo scopo di aumentare, complementare, o rimpiazzare in caso di indisponibilità dei servizi essenziali.
I sistemi cosiddetti di *augmentation* possono agire a livello terrestre, spaziale o di utente.

I sistemi di *augmentation* spaziale **SBAS** (*Satellite Based Augmentation System*) si basano sulla trasmissione regionale da satellite di dati a supporto del GNSS che permettono di aumentarne considerevolmente la precisione e l'affidabilità per abilitare il GNSS all'uso in applicazioni *safety-critical,* (come l'aviazione) per cui il GNSS da solo potrebbe non essere sufficiente. Ad oggi esistono diversi sistemi di *augmentation*: **EGNOS**, European *Geostationary Navigation Overlay Service* (UE), WAAS (USA), MSAS (Giappone), GAGAN (India), KASS (Corea del Sud), ANGA (Africa Centrale), SouthPAN (Australia e Nuova Zelanda), BDSBAS (Cina) and SDCM (Russia). Questi sistemi supportano principalmente la navigazione aeronautica nelle rispettive zone di copertura.

I sistemi di augmentation terrestre **GBAS** (*Ground Based Augmentation System*) si basano su un concetto simile, con la differenza che la trasmissione avviene da

antenne terrestri. A causa della più limitata copertura, il ruolo dei sistemi GBAS, impiegati per diverse decadi, è stato ad oggi ridimensionato e integrato dai sistemi SBAS. Ai sistemi GBAS si affiancano sistemi di GNSS differenziale (DGNSS), che forniscono informazioni aggiuntive basate sulle misure di codice dei segnali GNSS, e i sistemi di Real-time Kinematic (RTK), a carattere più locale, che forniscono informazioni aggiuntive basate sulle misure di fase dei segnali GNSS.
A livello utente, i sistemi di augmentation utilizzano tecniche sofisticate basate sull'uso di altri sensori di navigazione. È il caso, in aviazione, dei sistemi ABAS (*Aircraft Based Augmentation System*) di cui il RAIM (*Receiver Autonomous Integrity Monitoring*), con la sua versione *Advanced* (ARAIM) è la tecnologia più diffusa.
Infine, i ricevitori GNSS, già per la categoria consumer, ad oggi stanno convergendo verso l'uso di soluzioni multi-frequenza e multi-costellazione (individualmente o entrambe). Sorgenti multiple consentono di utilizzare la diversità per ridurre gli errori e aumentare i campioni di misura. Il chip Broadcom BCM47755 per smartphone è stato il primo che, dal 2018, supporta multi-costellazione (Galileo, GPS, GLONASS, Beidou, QZSS) e multi-frequenza (L1/E1 e L5/E5), utilizzato per primo sullo smartphone Xiaomi Mi 8.

Restringendo al caso dell'Europa, il portafoglio di servizi disponibili erogati dal sistema Galileo è elencato nella tabella seguente. Esso mostra come lo spettro di possibili applicazioni date dall'uso del solo sistema Galileo sia estremamente ampio.

Galileo Open Service (OS)	Fornito gratuitamente agli utenti, fornisce servizi di posizionamento, con un'accuratezza nell'ordine dei 2 metri in orizzontale e verticale, e informazioni di sincronizzazione, con accuratezza nell'ordine dei 5ns.
Galileo Open Service Navigation Message Authentication	Parte del servizio OS, fornisce funzionalità di autenticazione per garantire all'utente l'origine autentica delle informazioni ricevute
High-Accuracy Service (HAS)	Fornito gratuitamente, fornisce agli utenti dati addizionali per aumentare l'accuratezza del posizionamento (fino a 20cm in orizzontale e 40cm in vertical). È pensato principalmente per applicazioni professionali e commerciali.
Signal Authentication Service (SAS)	Fornisce un livello ancora più sicuro di autenticazione rispetto all'OS-NMA per utenti professionali e commerciali.
Public Regulated Service (PRS)	L'uso di questo servizio è riservato ad utenti governativi autorizzati per applicazioni sensibili. Il servizio è più sicuro, accurate e sofisticato rispetto all'OS.
Emergency Service (ES)	Il servizio è gratuito e permette di notificare gli utenti interessati riguardo un disastro naturale o in generale emergenze in una particolare area.
Timing Service (TS)	Il servizio di timing fornisce un riferimento di tempo molto accurato ed allineato al tempo universale tramite la sincronizzazione con i più importanti laboratori del settore.
Search And Rescue	Galileo supporta il servizio SAR dell'ente COSPAR-SARSAT che permette di ricevere messaggi di soccorso, inviare messaggi e indirizzare i soccorsi verso l'utente interessato.
Integrity-monitoring	Standardizzati a livello internazionale o europeo per l'uso in servizi safety-of-life (servizi da cui dipende la vita di persone) questi servizi complementano servizi simili forniti da sistemi di augmentation come EGNOS.
Space Weather	Servizi per il monitoraggio di possibili interferenze o tempeste elettromagnetiche che allertano l'utente di potenziali problemi nella fornitura dei servizi GNSS.

Tabella 2: Portafoglio di servizi erogati dal sistema Galileo

I sistemi GNSS stanno in questi anni evolvendo. In particolare, nel caso europeo di Galileo, la **seconda generazione**, che gradualmente rimpiazzerà la prima generazione costituita dai satelliti al momento in orbita e i sistemi di terra attualmente operativi, offrirà agli utenti un ventaglio di servizi molto più ampio e un'accuratezza maggiore per i servizi già erogati. Il primo dispiegamento è previsto per il 2024 ed è previsto venga completato in circa 6 anni.

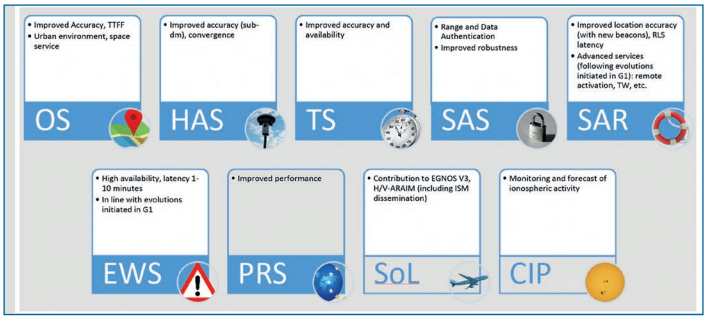


Figura 3: Figura 3: Galileo Seconda Generazione – Maggiori innovazioni (Fonte: EC, European Radio Navigation Plan 2023)

Il successo del mercato PNT ha anche creato ulteriori opportunità nel mondo spaziale, in particolare:

- L'utilizzo di costellazioni LEO (in orbita bassa) per aumentare la copertura in aree urbane e complementare la costellazione MEO (orbita media, nella quale si trovano tutte le costellazioni GNSS attuali). Molte iniziative commerciali sono anche nate grazie alla progressiva riduzione dei costi di produzione dei satelliti e la relativa velocità di sviluppo e lancio. L'ESA (European Space Agency) ha lanciato un'iniziativa per dotare l'Europa di una costellazione LEO-PNT.
- La fornitura di servizi di posizionamento che prevedono la trasmissione di correzioni (servizi PPP) tramite costellazioni commerciali per utenti professionali.
- L'uso di segnali alternativi per scopi di navigazione, i cosiddetti segnali di opportunità. Tali segnali, sebbene non disegnati per il posizionamento ed emessi ad esempio da costellazioni di telecomunicazioni, consentono di migliorare robu-

stezza e accuratezza. Questo concetto è stato ancora più rafforzato dalla decisione dell'organismo 3GPP, che sta definendo lo standard 5G, di inserire un servizio dedicato al posizionamento nel nuovo standard, portando enormi opportunità nel mondo GNSS sia grazie all'integrazione col 5G terrestre che con il 5G spaziale quando questo sarà disponibile su piattaforme in orbita.
Importante menzionare infine le tecniche di sensor fusion o ibride che hanno il ruolo di garantire una navigazione sempre più accurata e robusta utilizzando sorgenti di informazione diverse (accelerometri, camere, LIDAR etc) che, tramite algoritmi di ibridizzazione, consentono di migliorare l'accuratezza ma soprattutto la robustezza dell'informazione PNT anche quando il servizio GNSS è degradato.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

L'Europa ha investito, tra il 2014 e il 2020, 7 miliardi di euro nei programmi di Navigazione ed ha pianificato 2.1 miliardi annui, per un totale di 14.6 miliardi, tra il 2021 e il 2027. Questo budget è riservato allo sviluppo, mantenimento e operazioni del sistema (upstream) ed alle evoluzioni dei servizi. Per quanto riguarda invece l'Agenzia Spaziale Europea, nel triennio 2022-2025 sono stati riservati 351 milioni in particolare con riferimento alle missioni LEO-PNT (missione di navigazione europea in orbita bassa), GENESIS (missione per la valutazione del riferimento geodetico da satellite) ed il programma NAVISP (Navigation Innovation and Support Program), che supporta sviluppi nel campo del midstream e downstream.
Questi numeri, che sottolineano il notevole impegno dell'Europa in questo mercato, sono giustificati da una quota di mercato globale stimata, nel 2021, al 24% del totale, cioè circa 1 trilione di euro, cumulativo, fino al 2033. L'industria privata in Europa ha inoltre investito circa 50 milioni di euro nel solo 2019 (dati EUSPA, GNSS investment report del 2021) nel mercato dei servizi GNSS.

È importante notare che le risorse economiche necessarie allo sviluppo del mercato GNSS non sono unicamente dedicate all'innovazione nel campo della navigazione satellitare ma hanno ricadute su molte altre tecnologie, tra cui:

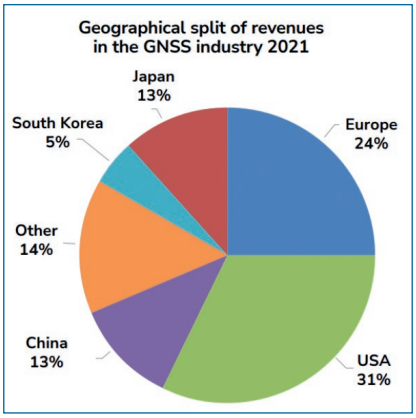


Figura 3: Galileo Seconda Generazione – Maggiori innovazioni
(Fonte: EC, European Radio Navigation Plan 2023)

- Intelligenza artificiale, utile per il context-based navigation e rilevazione di attacchi
- Computer vision, per l'uso delle camere come complemento al GNSS
- 5G, per la navigazione tramite rete cellulare
- Circuiti integrati, per la miniaturizzazione di ricevitori sempre più sofisticati
- Cloud computing, per trasferire i processamenti più onerosi dai devices portatili al cloud

In termini di ricadute occupazionali il mercato del GNSS in Europa impiega circa 3500 persone per milione di abitanti nelle sole attività R&D (dati 2018). In termini economici un report del governo del Regno Unito ha dimostrato come il GNSS abbia apportato, cumulativamente in tutti i mercati in cui è utilizzato, un impatto economico quantificato a **13 miliardi di sterline all'anno** (circa 15 miliardi di euro), mentre l'impatto economico di una indisponibilità del GNSS a fronte di problemi tecnici che ne inibiscano la fornitura del servizio sono stimati a circa **7 miliardi di sterline** a settimana (circa 8 miliardi di euro). Questo fa capire da un lato che i benefici del GNSS, evidenti nell'utilizzo quotidiano, abbiano delle ricadute economiche notevoli, dall'altro che la dipendenza da questi sistemi richiedono continui investimenti che ne migliorino la continuità, robustezza e affidabilità.

OROLOGI ATOMICI SPAZIALI NEXT GENERATION

L'utilizzo di riferimenti di tempo ultra-stabili, forniti da orologi atomici, è al centro di varie applicazioni in ambito Spazio che vanno dai test di Fisica Fondamentale alla Navigazione nello Spazio Profondo, dalle Telecomunicazioni Satellitari ai Sistemi di Navigazione regionali e globali (GNSS).
Nel contesto GNSS, gli orologi a bordo dei satelliti forniscono i segnali di frequenza ultra-stabile che, assieme all'informazione della posizione dei satelliti, permettono ad un ricevitore/utente a terra di ricavare le proprie 3+1 coordinate spazio-temporali, 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 dal segnale, 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 1). Questo orologio atomico vola, come orologio primario, con pieno successo sui satelliti del sistema di navigazione europeo Galileo. Nella figura sono mostrate anche le "facilities" necessarie alla costruzione, integrazione e collaudo degli orologi.
È da sottolineare il ruolo primario dell'industria italiana (Leonardo S.p.A.) nello



Figura 1: Maser passivo realizzato in Leonardo e facilities di produzione integrazione dedicate in Leonardo.

sviluppo di questo prodotto, che la pone in una posizione di assoluta leadership a livello mondiale.
In totale, a metà 2023 Leonardo, in collaborazione con una solida filiera di fornitori, ha fornito al sistema GNSS Galileo 57 modelli di volo e tutti i modelli sono stati lanciati con successo. Altri modelli sono in costruzione sempre per Galileo.
Il consolidamento dello sviluppo di orologi allo stato dell'arte per Galileo contribuisce direttamente ai seguenti aspetti chiave per la comunità europea:

- Precisione e affidabilità del sistema di posizionamento con copertura globale in vari ambiti quali: i trasporti, l'agricoltura, le telecomunicazioni.
- Sicurezza e servizi pubblici come il servizio di salvataggio che sono essenziali in situazioni di emergenza e per le autorità pubbliche.
- Opportunità economiche, sia attraverso la creazione di posti di lavoro nell'industria spaziale e delle tecnologie, che attraverso l'offerta di servizi commerciali.
- Competitività globale, attraverso la riduzione della dipendenza dalle tecnologie non europee.

Al fine di conservare l'eccellenza nel settore orologi atomici, Leonardo sta esplorando alcune soluzioni tecnologiche e ingegneristiche mirate alla riduzione del peso e dei consumi di potenza elettrica, mantenendo le prestazioni in termini di affidabilità, stabilità e la compatibilità con l'ambiente spaziale, in vista della prossima generazione di sistemi di navigazione.

STATO DELL'ARTE

In Europa e nel mondo, si stanno compiendo notevoli sforzi per sviluppare orologi sempre più precisi che possano supportare sistemi di navigazione di nuova generazione e il posizionamento accurato delle sonde spaziali portando a progressi significativi nella nostra capacità di esplorare e comprendere l'universo.

La cooperazione internazionale in questo settore è essenziale. A livello mondiale, gli Stati Uniti, la Russia e la Cina stanno investendo considerevolmente nello sviluppo di orologi spaziali basati su tecnologie alla frontiera in collaborazione tra gli istituti nazionali di metrologia e i maggiori enti di ricerca, anche al fine di migliorare le infrastrutture dei sistemi GNSS nazionali (rispettivamente GPS, GLONASS, BEIDOU).

Recentemente, grazie ai progressi realizzati nell'ambito delle tecnologie quantistiche e della fotonica, è nato un notevole interesse verso la miniaturizzazione di orologi atomici che sta portando ad una forte spinta alla ricerca e sviluppo nelle industrie di settore.

In questo panorama, l'Italia ricopre tradizionalmente un ruolo strategico. In ambito spazio la stretta collaborazione tra Leonardo e i maggiori enti di ricerca nazionali ha portato alla realizzazione di prodotti di riferimento nel settore della navigazione.

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 potenziale risparmio significativo su massa, dimensioni e consumo di potenza elettrica.
In questa direzione Leonardo ha sviluppato e validato a livello EM il mini-PHM che, a fronte di 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.
Leonardo ha completato la validazione del design del sistema fisico dell'orologio prodotto internamente, mediante una campagna di test di prestazioni in ambiente rappresentativo su due prototipi EM (Engineering Model) del sistema fisico dell'orologio. Attualmente è in corso la validazione del sistema ottico ed elettronico attraverso modelli ingegneristici Elegant Bread-board con risultati preliminari estremamente soddisfacenti.

I prossimi passi prevedono la costruzione di modello EQM e la sua successiva qualifica, con l'obiettivo di sfruttare l'eventuale opportunità di validazione in volo della tecnologia Rb-POP su satelliti sperimentali delle prossime generazioni di Galileo.

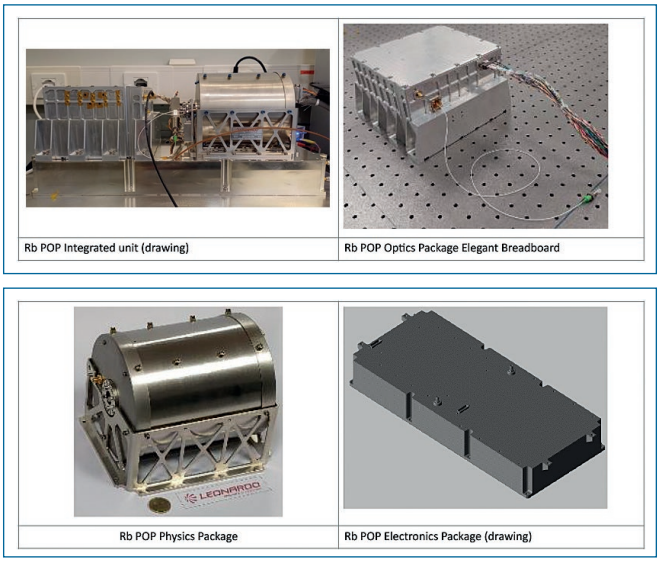


Figura2: Sistema Fisico Del Rb-Pop Per Applicazioni Spazio Realizzato In Leonardo.

Parallelamente alla realizzazione dei modelli EM 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 ottenuti risultati pienamente soddisfacenti dimostrando la capacità di Leonardo di affrontare una futura produzione in piena autonomia.
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.

Recentemente la comunità scientifica internazionale ha mostrato forte interesse verso lo sviluppo di orologi atomici di tipo ottico che sfruttano transizioni atomiche a frequenze di centinaia di Tera-Hertz con conseguente miglioramento delle prestazioni di stabilità ed accuratezza. Anche in questo campo Leonardo

è attivamente coinvolta in collaborazione con l'Agenzia Spaziale Italiana per lo sviluppo di un prototipo di orologio ottico trasportabile ad altissime prestazioni che sfrutta gli atomi ultra-freddi con future possibilità applicative in ambito metrologico e GNSS nel segmento terrestre.

In aggiunta, sono in corso studi di fattibilità per un Optics-Physics Package di un orologio ottico miniaturizzato basato su atomi di Rubidio in cella MEMS con prospettive di scalabilità on chip per future applicazioni in ambito aerospaziale.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

Data la natura estremamente complessa e di "frontiera" delle tecnologie necessarie agli orologi atomici, è necessario mantenere una continua attenzione agli studi/sviluppi associati, cosa che si traduce in un attento e continuo finanziamento delle attività sia da parte dell'industria, sia dei soggetti che ne utilizzano le capacità tecnologiche, mantenendo in questo modo un'eccellenza italiana riconosciuta a livello mondiale.

TELECOMUNICAZIONI

LE RETI DI COMUNICAZIONE NELLO SPAZIO DEL FUTURO: PROTOCOLLI 5G NR NTN E 6G

Lo spazio sta conoscendo un rinnovamento epocale che lo sta portando a cambiare rapidamente il suo paradigma di tecnologia di nicchia per diventare qualcosa di molto più vicino al senso comune dei prodotti e servizi di tipo consumer come oggi già avviene per la telefonia mobile, l'accesso a Internet e quant'altro.
La peculiarità dei sistemi spaziali di comunicazione e connessione è quella di poter garantire una copertura globale in tutte le parti del mondo anche ai poli, e l'esigenza di connettività degli utenti e dei sistemi, che sta diventando sempre più estesa e pressante, sta consentendo di trasformare i satelliti in nodi rete come già avviene nella rete Internet in cui router e server ne garantiscono il funzionamento ottimale. Questo grazie all'evoluzione e allo sviluppo della digitalizzazione a bordo satellite che sta miniaturizzando le dimensioni del carico utile (payload o P/L) e lo sta rendendo sempre più prestazionale per quanto alle capacità di processamento, quantità di memoria e capacità di immagazzinamento dati a bordo. Questo sta rendendo i satelliti del futuro immediato più simili a dei computer e laptop come quelli che utilizziamo ogni giorno nella nostra vita quotidiana.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Lo sviluppo tecnologico accelerato e anche gli stimoli che derivano dalle attuali situazioni geo-politiche internazionali, (guerra Russo-Ucraina, situazione di instabilità del Medio Oriente e quant'altro), in cui sta sempre più crescendo la necessità di connessione in zone del mondo non coperte o in cui le infrastrutture di comunicazione e telecomunicazione sono in serio pericolo di essere distrutte, rese inaccessibili alla maggior parte degli utenti o violate da aggressioni hacker, sta sempre di più spingendo l'accesso allo spazio a divenire un'opportunità concreta per facilitare la connessione ovunque nel mondo.
L'implementazione di sistemi spaziali con satelliti di telecomunicazione non più solo considerati come un semplice "filo virtuale" per collegare dei punti tra loro, ma provvisti di capacità e funzioni a bordo molto complesse e performanti, in grado di essere collegati tra loro (costellazioni di satelliti) e con la terra verso utenti o reti terrestri, costituisce oggi un'opportunità unica e imperdibile per gli utenti

sempre più desiderosi di collegarsi alla rete ovunque e comunque.
Ormai lo sviluppo tecnologico che in questi ultimi decenni ha sempre di più caratterizzato tutti i settori dell'ingegneria spaziale come anche quella terrestre, consente oggi di poter andare rapidamente ed efficacemente verso il concetto di Sistemi di Rete nello Spazio.
In Figura 1 si riporta la visione di reti integrate spazio-terra in grado di servire sia utenti della rete fissa che mobili.

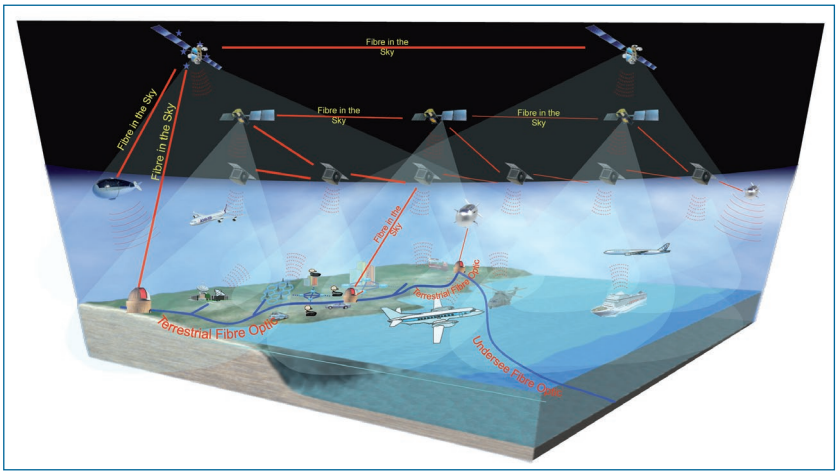


Figura 1: Visione di reti integrate spazio-terra per utenti fissi e mobili (Fonte: V. Schena)

Questo sta portando a concepire e implementare una visione più estesa del concetto di "rete d'accesso" (anche ad Internet), dandole una visione quasi "tridimensionale" perché non più relegata alla bidimensionalità delle reti d'accesso terrestre ma allargata e protesa verso l'alto, verso lo spazio, verso le varie posizioni orbitali a cui un sistema satellitare può essere collocato.
Se questo scenario lo riportiamo nella nostra esperienza quotidiana di utenti richiedenti connettività, con i nostri handleset (smartphone, tablet, computer e quant'altro), abituati a vedere il nostro orizzonte di collegamento al ponte radio più vicino o alla fibra o doppino che ciascuno di noi ha a casa, ecco che lo sguardo si allarga verso lo spazio e ci dona l'opportunità di nuovi servizi e relative applicazioni nei campi più svariati (dal trasporto della posta con droni alla possibilità di

remotizzare sempre di più la nostra casa rendendola anche più intelligente e funzionale e tanti altri servizi innovativi che di giorno in giorno nascono nella Rete).
L'integrazione tra rete terrestre (Terrestrial Network o TN) e reti in alto o nello spazio, cioè non terrestri (Non Terrestrial Network o NTN) è la chiave del presente e del futuro delle telecomunicazioni e questo scenario si sta ulteriormente allargando verso il nostro satellite naturale, la Luna, che grazie a questa nuova e potente opportunità di rete integrata, sarà resa più vicina a noi potendo usufruire delle sue risorse e rendendo più realistici e possibili i viaggi interplanetari dell'uomo verso i pianeti del Sistema Solare come Marte.
Tornando con "i piedi e la mente" per terrea, è necessario comprendere come possiamo effettivamente consentire che lo scenario su descritto si realizzi. La risposta è nel continuare lo sviluppo di diverse tecnologie abilitanti che coprano tutti i livelli del concetto di rete, ovvero:

- Avere protocolli di comunicazione comuni con reti terrestri come oggi sta facendo il protocollo 5G e tra poco 6G che propone la versione NTN per lo spazio con tutto il suo carico di novità e potenzialità tecnologiche.
- Avere sevizi integrati anche nelle reti satellitarie, quindi, a bordo satellite come già avviene nei nodi della rete terrestre (clouding, processamento di prossimità, calcolo distribuito in rete e quant'altro).
- Avere capacità di sicurezza informatica (cyber-security) anche a bordo satellite, in modo da garantire sicurezza agli utenti anche quando accedono alle reti nello spazio e i suoi servizi come già avviene nella Rete terrestre. Questo sta portando all'implementazione di nuovi e più efficaci paradigmi di crittografia come il potenziamento di quella classica e l'introduzione del Post Quantum Cryptography (PQC) e altre che si stanno affacciando all'orizzonte come la Quantum Key Distribution (QKD). Tutto ciò porterà rapidamente a fondersi in modo trasparente e continuo l'accesso alla Rete da parte dell'utente tra spazio e terra, consentendogli maggiori prestazioni e maggiore sicurezza nella salvaguardia dei suoi dati e dei suoi servizi.
- Avere la possibilità di andare rapidamente alle telecomunicazioni del futuro che saranno dominate, potenziate e facilitate dall'uso di tecnologie quantistiche per le comunicazioni, ovvero: le Quantum Communication Infrastructures (QCI).

Le nuove tecnologie del protocollo 5G NR NTN/6G (NR NTN: indica New Radio Non Terrestrial Network) permettono di implementare nello spazio sistemi di reti innovativi (SpaSyNET), in cui il singolo satellite assume il ruolo anche di nodo della rete perché interconnesso con i satelliti/nodi vicini per mezzo di link ad alta efficienza e affidabili. Il target complessivo o di sistema da raggiungere, è quello di poter disporre di costellazioni satellitari in configurazione di rete atte ad agire come e in complementarità con le reti terrestri (ad esempio per l'accesso ad Internet) per aver un accesso ovunque nel mondo da parte degli utenti e porgli consentire di servizi integrati nelle reti SpaSyNET come già avviene nella Rete Internet.

STATO DELL'ARTE

Come già descritto nel precedente paragrafo, oggi, la domanda sempre crescente di connettività da parte degli utenti e la notevole maturità tecnologica raggiunta dai sistemi spaziali hanno innescato nuove opportunità e nuovi scenari di mercato. Ciò sta accelerando significativamente l'implementazione dei sistemi nello spazio, il che sta riducendo significativamente i costi di implementazione e i servizi correlati. Questo fenomeno ha innescato un nuovo paradigma economico identificato come Space Economy.

Tra le tecnologie più promettenti che questo scenario sta proponendo e supportando, è quello del protocollo d'accesso unico tra reti terrestri e reti spaziali ovvero il 5G NTN/6G.

TAS-I, con il suo Dominio Telecomunicazioni Italia (DTI), è già da tempo coinvolta e concentrata a sviluppare conoscenza e business per quanto ai sistemi di rete nello spazio, definiti Space System Network o SpaSyNET in cui tra gli elementi tecnologici di maggior sviluppo e innovatività è costituito dal protocollo 5G NTN/6G e le sue tecnologie declinate nell'ambiente spazio. A dimostrazione di ciò, TAS-I/DTI è coinvolta in diverse iniziative di ricerca e sviluppo (R&D) e progettuali con le maggiori Agenzie Europee tra cui ESA, ASI e EU per poter sviluppare le tecnologie necessarie all'implementazione gli elementi fondamentali delle reti 5G NTN/65 ovvero le gateway di accesso o gNodeB da integrare anche direttamente a bordo

satellite, le tecnologie dei terminali o User Equipment (UE), la rete di accesso dedicata al 5G ovvero la Core Network (CN) anch'essa da integrare nelle costellazioni satellitari costituenti le SpaSyNET.

Tra i progetti di maggio spicco e più significativi dell'interesse e degli sviluppi che TAS-I/DTI stanno portando avanti con l'Agenzia Spaziale Europea (ESA) e quella italiana (ASI) spicca il Progetto dal titolo "Demonstration of an experimental 5G g-NodeB in space" accorciato in MIXELS[1].

MIXELS è un progetto sperimentale che prevede una missione di volo satellitare reale in cui si integrano su carichi utili satellitari digitali o rigenerativi, le funzionalità sia radio che di livello superiore dello stack protocollare ISO/OSI[2] di un gNodeB 5G NTN con anche funzioni per l'ottimizzare e la gestione delle risorse radio, supportando l'allocazione dinamica delle risorse verso gli utenti finali che usano un UE. Oltre a ciò, il progetto esamina configurazioni di gNodeB innovative come previste dallo standard[3], tra cui le divisioni Central Unit (CU) e Distributed Unit (DU), per migliorare la flessibilità del sistema, ridurre la latenza e migliorare l'efficienza spettrale complessiva nelle reti 5G basate su satellite. Attraverso un sistema di laboratorio (test-bench) e successivi test in orbita, MIXELS valuta le prestazioni di varie configurazioni architettoniche, valutando soluzioni che si allineano agli standard globali per le applicazioni Non-Terrestrial Network (NTN).

MIXELS mira a sviluppare e convalidare gNodeB 5G sperimentali distribuiti su satelliti LEO. Garantire la conformità agli standard 3GPP Rel. 17 è un pilastro centrale: garantisce che le soluzioni proposte siano innovative e allineate alle normative globali emergenti.

Il progetto MIXELS è strutturato in due fasi principali:

- Fase 1: in cui si definisce e convalida dell'architettura del sistema, inclusa la creazione di un banco di prova di laboratorio per replicare le condizioni in orbita.
- Fase 2: in cui si affina l'architettura ela si testa in volo in una campagna sperimentale con satelliti digitali già presenti in orbita.

[1] *ESA Study "Demonstration of an experimental 5G g-NodeB in space"; Contratto ESA n. 4000141692/24/NL/AF)*

[2] *ISO - International Organization for Standardization*

[3] *https://www.3gpp.org/technologies/ntn-overview*

In Figura 2 si schematizza l'implementazione del dimostratore di MIXELS in cui si prevede il posizionamento dell'intero gNodeB a bordo del primo satellite, mantenendo il secondo satellite come link trasparente.
L'iniziativa del Progetto MIXELS è, al momento, un "unicum" in Europa che sta suscitando forte interesse nella comunità Europea coinvolta nell'implementazione del paradigma protocollare 3GPP 5G NR NTN per quanto al gNodeB direttamente integrato a bordo satellite. Tale esperimento consentirà di valutare le reali prestazioni di come un elemento di rete, altrimenti integrato nelle reti a terra (ground segment), sia in grado di migliorare e rendere più fruibili agli utenti l'accesso in rete anche direttamente nello spazio, costituisce un'opportunità imperdibile per poter promuovere prodotti reali e certificati (conformi allo standard 3GPP in toto) per implementare effettivamente il paradigma dei nodi di rete direttamente nello spazio (obiettivo di SpaSyNET).

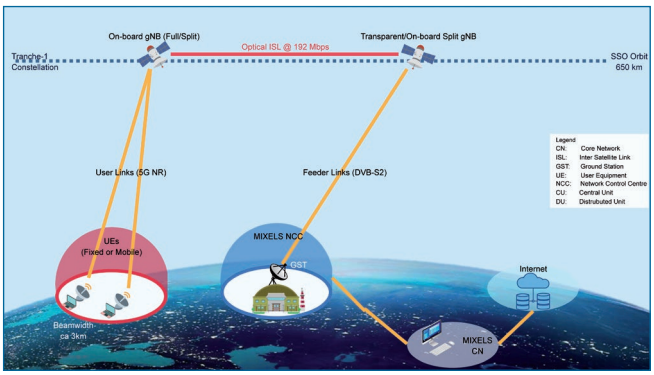


Figura 2: : Schema dell'esperimento in volo del progetto MIXELS[4]

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

Thales Alenia Space Italia (TAS-I) assieme alle sue compagini europee, sta concretamente contribuendo allo sviluppo delle reti integrate spazio-terra, promuovendo e sviluppato il suo protocollo di elezione ovvero il 5G NR NTN.
Lo stimolo che spinge l'Azienda in tale impresa è dovuto ad una lungimiranza nell'intercettare i forti stimoli che la Space Economy sta producendo nel bene,

[4] *ESA Study "Demonstration of an experimental 5G g-NodeB in space"; Contratto ESA n. 4000141692/24/NL/AF)*

con l'introduzione di tecnologie molto innovative e performanti (oltre al protocollo 5G oggetto del presente articolo, si annoverano le tecnologie ottico-fotoniche, quelle quantistiche per le telecomunicazioni, le tecniche di cyber-security nello spazio come il Quantum Key Distribution e il Post Quantum Cryptography e le metodologie basate su Intelligenza Artificiale e Machine Learning per sistemi spaziali) e nel male, legato ad un'accresciuta concorrenza spesso da parte di enti improvvisati ma anche da parte di altri moto agguerriti e dotati di risorse provenienti da settori che nulla hanno che fare con lo spazio ma che sono disponibili.
Per tale ragione affinché ci sia un rinnovamento dell'industria e della comunità che si occupa di spazio in Europa ormai dalla fine della Seconda Guerra Mondiale, è necessario che il supporto dei Governi tramite le loro Agenzie e dell'Europa con le sue Istituzioni ed Enti continuino ad investire.
Oggi si è raggiunta la giusta consapevolezza di quanto lo spazio stia diventando una forte opportunità per il mercato e per l'incremento dei servizi verso il cittadino ovunque esso si trovi.
In Figura 3 è riproposto lo schema che è stato presentato per altre "Tecnologie Prioritarie per l'Industria", di cui anche questo articolo ne è parte. Tale schema rappresenta un possibile modello di cooperazione tra enti di ricerca e produttivi (in



Figura 3: Roadmap di sviluppo collaborativo per la tecnologia ottico-fotonica[5]

[5] Tecnologie Prioritarie per l'Industria 2020, SETTORE SPAZIO, Tecnologia Prioritaria N. 24: "Ottica e Fotonica per lo Spazio: la Nuova Frontiera per Innovare alla Velocità della Luce", Tecnologia a cura di Vincenzo Schena; volume a cura di Airi, Roma, Agra Editrice, 2020.

dustria) con le istituzioni finanziatrici, per generare e gestire un "circolo virtuoso" in grado di consentire al mondo dell'industria spaziale di cogliere le forti opportunità che "ora" la Space Economy sta proponendo e le sfide che essa ha innescato.
L'Agenzia Spaziale Italiana già per la Ministeriale 2022 (CMIN22) ha stanziato un congruo finanziamento per le tecnologie 5G/6G in ambito Frame ARTES 4.0 di ESA. Si spera che cresca l'interesse dell'Agenzia Italiana per il Progetto Europea IRIS2 in cui, per la prima volta si potrà integrare e utilizzare il protocollo 5G NR NTN. Per questo sarebbe necessario un posizionamento più concreto da parte italiana, cercando di contribuire allo sviluppo delle tecnologie più di punta e innovative come appunto quelle legate al protocollo ma anche allo strato fisico e di connettività (link ottici, antenne smart a bordo satellite e quant'altro).
La prossima Ministeriale, ovvero quella del 2025 (CMIN25), rappresenta un'opportunità imperdibile per incrementare gli investimenti, portando quello per lo sviluppo del protocollo e delle tecnologie ad esso correlate a superare abbondantemente i 100 M€, integrandoli con quelli negli altri campi tecnologici correlati (ottico, cybersecurity, IRIS2 e quant'altro)
Accrescere ulteriormente la sensibilità delle nostre Istituzioni Nazionali ed Europee è necessario e quasi urgente, visto il nuovo e inaspettato scenario politico internazionale che sta evidenziando quanto l'Europa e i suoi Stati Membri debbano continuare ad accrescere la loro consapevolezza di essere sempre di più autonomi da altre parti del mondo, affermando in modo più incisivo e efficace la Sovranità Tecnologica Europea e Italiana in particolare.

LE TECNOLOGIE OTTICO-FOTONICHE

Il settore delle comunicazioni satellitari (SATCOM) sta vivendo una fase di rinnovamento epocale; infatti, se nei decenni passati era legato principalmente a missioni militari e istituzionali (ad esempio comunicazioni in caso di emergenza, protezione pubblica e soccorso in caso di calamità…) e , quindi, con una forte connotazione di nicchia e con alti costi associati, oggi si sta muovendo rapidamente verso un mercato più "consumer" e con costi più contenuti fermo restante la qualità dei suoi prodotti.

Quanto sopra è oggi possibile grazie anche all'enorme crescita ed evoluzione delle tecnologie spaziali avvenuto nell'ultimo ventennio e ancora in corso, come quelle in ambito ottico-fotoniche che stanno sempre di più complementando le tipiche tecnologie in radio-frequenza e digitali.

Lo scopo del presente articolo è di illustrare quanto si sta facendo, particolarmente in Italia, per l'implementazione di tecnologie basate su sistemi ottico-fotonici satellitari per progettare e implementare carichi utili (in seguito payload o P/L) SATCOM e incentivanti per lo sviluppo di costellazioni satellitari molto dense e in tutte le orbite (LEO, MEO, GEO), i cui satelliti saranno interconnessi per mezzo di link ottici (Opto-Inter Satellite Link o O-ISL).

I link ottici nello spazio consentono di poter gestire traffico dati aggregato, ovvero operare un servizio simile a quello che oggi si fa con le dorsali intercontinentali/transoceaniche in fibra ottica.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

L'enorme crescita della richiesta da parte del mercato di telecomunicazioni anche in vista di servizi nuovi e stimolanti, sta accelerando il miglioramento della tecnologia spaziale. La domanda di connettività a banda larga, alto bit-rate (alto throughput), bassa latenza e disponibile ovunque è aumentata drasticamente.

D'altro canto le tecnologie spaziali sono oggi ad un grado di maturità tale da consentire di poter soddisfare a pieno quanto descritto. Tra queste tecnologie sicuramente quelle ottico-fotoniche per lo spazio sono tra le più concrete e in grado di soddisfare le richieste e le prestazioni degli utenti.Oggigiorno, le tecnologie ottico-fotoniche hanno già una vasta gamma di applicazioni nello spazio,

come nel telerilevamento per l'osservazione della Terra, la sensoristica, i sistemi di assetto dei satelliti (giroscopi a stato solido integrati) e quant'altro e, oggi, anche per le telecomunicazioni spaziali o SATCOM, sia del presente che del prossimo futuro. Questo anche grazie alla promozione e il supporto dalle Agenzie europee coinvolte nello spazio, quali l'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) quella Europea (ESA) e la Commissione Europea (CE) nonché quelle per la Difesa.

L'idea fondamentale dei collegamenti SATCOM ottici è sinteticamente espressa dallo slogan "Fiber in the Sky". Come scritto nell'introduzione, essa non vuol essere in sostituzione dei collegamenti in fibra ottica già sviluppati nelle reti terrestri, sia locali (ultimo miglio) che internazionali (dorsali in fibra transcontinentali/transoceaniche), ma bensì un completamento di queste per estendere la connettività a larga banda anche in posti del modo non raggiunti da opportune tecnologie di collegamento. Questo contribuirà anche a ridurre drasticamente e effettivamente il "Digital Divide".

In Figura 1 è riportato in modo sintetico, il concetto delle reti ottiche spaziali combinate con quelle terrestri in fibra e addirittura in previsione di collegare anche le reti satellitari future che saranno attorno alla Luna nei prossimi anni.

Il primo passo implementativo che si sta affrontando, vede un'ibridizzazione o combinazione tra tecnologie ottico-fotoniche e quelle tipicamente digitali. I primi carichi utili (payload) satellitari che si stanno concependo, progettando e realizzando, implementano questa ibridizzazione. Questo sta facilitando e accelerando lo sviluppo, in continuità e senza creare "traumi tecnologici" e anche facilitando ai progettisti l'affrontare le nuove tecnologie e, quindi, le nuove sfide senza dover abbandonare l'esperienza e la conoscenza acquisita negli anni.

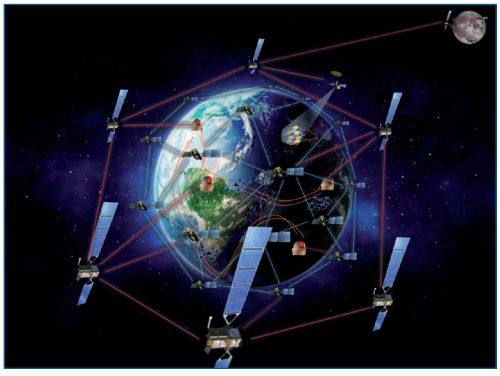


Figura 1: Le reti ottiche integrate spazio-terra (Fonte: V. Schena)

In conclusione, la motivazione per sviluppare le nuove tecnologie ottico-fotoniche sono motivate da dover implementare nello spazio sistemi di reti innovativi, in cui il singolo satellite assume il ruolo anche di nodo della rete perché interconnesso con i satelliti/nodi vicini per mezzo di link ad alta efficienza e affidabili: i link ottici. Questo è consentito dal forte sviluppo e maturità delle tecnologie ottiche in ambito spaziale. Il target complessivo o di sistema da raggiungere, è quello di poter disporre di costellazioni satellitari in configurazione di rete atte ad agire come e in complementarità con le reti terrestri (ad esempio per l'accesso ad Internet) per aver un accesso ovunque nel mondo e per i futuri mondi (accesso alla Luna).

STATO DELL'ARTE

Come già anticipato, per comprendere l'importanza delle tecnologie ottico-fotoniche per lo spazio (e non solo) e il loro stato dell'arte in Europa e nel mondo, è necessario puntare l'attenzione sull'innovativo concetto di rete d'accesso estesa nello spazio e interconnessa in continuità e trasparenza con quella terrestri. Tale concetto è ben sintetizzato dallo schema di Figura 2.

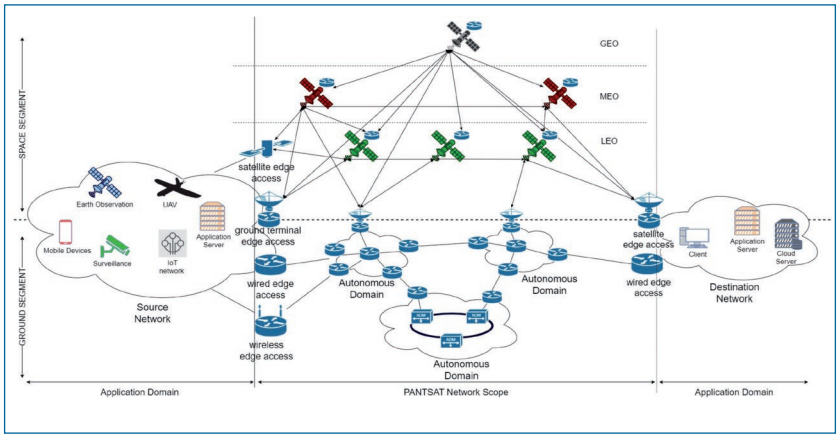


Figura 2 : Schema di Reti Integrate Spazio-Terra (Fonte: PANTSAT Study[1])

[1] *ESA Study "Path Awareness Techniques for Transport Protocols over Satellite" (PANTSAT); ESA Contract n. 4000142081/24/NL/EG*

Per il segmento spazio i sistemi di costellazioni dense è principalmente rappresentato da satelliti tipicamente in orbita bassa (Low Earth Orbit o LEO) o bassissima (Very LEO), ovvero a un'altitudine inferiore ai 2000 km, interconnessi e inter-operanti per coprire e operare su una parte enorme, o eventualmente l'intera totalità, della superficie terrestre. Tali configurazioni satellitari sono costituite da satelliti posizionati su una fascia orbitale definita da varie orbite vicine tra loro e collegate per formare, appunto, una rete spaziale, di satelliti interconnessi tramite Inter-Satellite-Links (ISL) e Inter-Orbit-Links (IOL), oltre alla connettività con le Stazioni di Terra (Ground Stations o GS) tramite dei link per traffico aggregato definiti anche "feeder link" (FL). Nel campo delle costellazioni dense (mega-constellation) esistono già oggi delle realtà commerciali concrete quali il sistema satellitare OneWeb[2], SpaceX con la costellazione Starlink[3], Telesat con la costellazione Telesat Light-speed[4] e anche con Amazon con il progetto Kuiper[5].

I satelliti delle costellazioni dense possono contare su capacità migliorate grazie all'implementazione di payload digitali, antenne multi-fascio flessibili (smart antenna) che implementano schemi di riutilizzo della frequenza (allo stesso modo delle reti cellulari terrestri), tecniche di modulazione e codifica ad alte prestazioni (MODCOD), e altro. A livello operativo, le costellazioni dense possono garantire forniture di servizi di comunicazioni a banda larga su coperture globale ed equamente distribuite sulla Terra, riducendo così il divario digitale sia nelle aree urbane che non urbane. Oltre a ciò, grazie alla loro posizione orbitale relativamente bassa, hanno la capacità di supportare applicazioni a bassa latenza, con tempi di round-trip dell'ordine dei 30 ms che sono tipici di satelliti LEO in orbita bassa. Le tecnologie necessarie e supportate dalle costellazioni dense, i cui satelliti componenti sono necessariamente interconnessi tra di loro, stanno fortemente incentivando lo sviluppo delle Space Optical Transport Network (Space OTN)[6], caratterizzate dall'utilizzo di connessioni ottiche con la capacità di stabilire collegamenti spazio-spazio e spazio-terra nelle frequenze ottiche come già anticipato nei paragrafi precedenti.

[2] *ESA Study "Path Awareness Techniques for Transport Protocols over Satellite" (PANTSAT); ESA Contract n. 4000142081/24/NL/EG*

[3] *Y. Henri, "The OneWeb satellite system." Handbook of Small Satellites: Technology, Design, Manufacture, Applications, Economics and Regulation. Cham: Springer International Publishing, 2020. 1091-1100*

[4] *https://www.starlink.com/technology*

[5] *https://www.telesat.com/leo-satellites/, https://www.aboutamazon.com/what-we-do/devices-services/project-kuiper*

[3] *N. Karafolas, "Optical Satellite Networking: The Concept of a Global Satellite Optical Transport Network." Near-Earth Laser Communications, Second Edition (2020): 401-428*

Rispetto ai collegamenti radio-frequenza (RF), i collegamenti Free Space Optical (FSO) presentano alcuni vantaggi fondamentali, come:

- velocità di trasmissione dati più elevate;
- dimensioni del corrispondente all'antenna RF, ovvero il "telescopio" o testata ottica, con dimensioni, pesi e ingombri più contenuti il che porta a una riduzione della massa, del volume e del consumo energetico a bordo satellite potendo richiedere anche piattaforme più piccole;
- maggiore direttività e minore divergenza del fascio, che portano a una maggiore resilienza alle interferenze e maggior sicurezza (nessuna possibilità di intercettare o bloccare un fascio ottico);
- nessuna limitazione derivante dalla regolamentazione nell'allocazione dello spettro[7].

Grazie a quanto sopra e alla maturità tecnologica raggiunta, le tecnologie ottico-fotoniche sono oggi sostenute da iniziative e progetti concreti supportati a livello europeo da ESA in accordo con le Delegazioni nazionali in particolare con quella italiana, ASI, ovvero il progetto HydRON DS (High thRoughput Optical Network Demonstrator System).
Come esempio fondante di questo ultimo concetto, va riportato che a fine dello scorso anno è stato siglato il primo contratto tra Thales Alenia Space Italia (TAS-I) e la European Space Agency (ESA), supportato dall'Agenzia Spaziale Italiana (ASI), per la realizzazione della prima missione di volo di HydRON DS in Fase B2/C/D/E che, entro un paio di anni porterà in orbita il primo satellite totalmente ottico di una costellazione Europea che sarà completata entro il 2030 (HydRON Mission).
Oggi HydRON DS è allo stato dell'arte tecnologico per quanto ai sistemo ottici SATCOM. Esso ingloba tecnologie notevolmente innovative sia per la parte ottica (quattro telescopi per link ottici ad alte prestazioni e versatilità) che per quella digitale (switch-router ad altissima velocità di commutazione e in grado di gestire un bit-rate per porta di notevole capacità ovvero più di 100 GB/s con la prospettiva di arrivare a 1 TB/s, entro il completamento dell'intera costellazione).
In Figura 3 si riporta in modo schematico una sintesi del sistema con un'evidenza delle varie capacità e tecnologie che lo sostituiscono.

[7] *A. U. Chaudhry and H. Yanikomeroglu, "Free Space Optics for Next-Generation Satellite Networks," in IEEE Consumer Electronics Magazine, vol. 10, no. 6, pp. 21-31, 1 Nov. 2021, doi: 10.1109/MCE.2020.3029772*

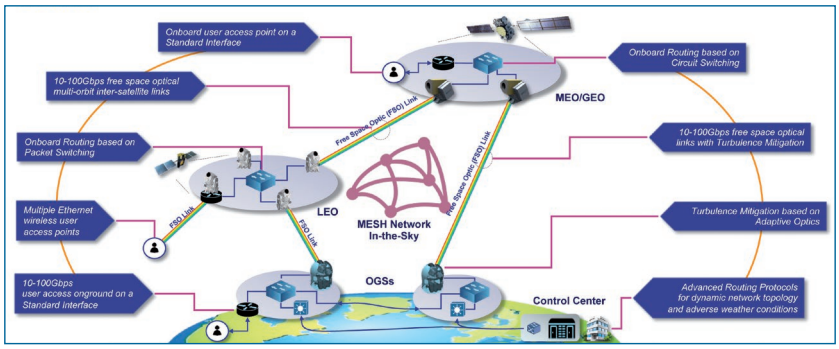


Figura 3 : Blocchi costitutivi principali di HydRON DS (Fonte: G. Titomanlio, D. Lo Forti e V. Schena)

Come già descritto, i link ottici oggetto dello spazio e, quindi, di HydRON DS, ma anche utilizzati in molte realtà terrestri, sono basati su tecniche di FSO ad alta capacità come illustrato in Figura 3. Con le FSO è anche possibile una connettività multi-hop (ad esempio per instradare un segnale attraverso diversi nodi spaziali e terrestri) supportate da tecniche di Wavelength Division Multiplexing (WDM) in analogia con quanto già si fa nelle reti in fibra ottica: questo consente una continuità tecnologica di indubbio valore!

Quanto sopra, ovviamente, impone la necessità di dover gestire le capacità di commutazione/instradamento dei segnali ottici a bordo del satellite in odo efficiente e performante: per questo la matrice di commutazione e instradamento (switch-router) a bordo satellite rappresenta uno degli elementi chiave del sistema. Tale sistema lo si sta sviluppando partendo da tecnologie di rete terrestre ormai consolidate da anni e correntemente presenti nel mercato. Questo approccio accelera notevolmente lo sviluppo e il "porting" di tali tecnologie verso lo spazio, partendo dal loro utilizzo in satelliti/costellazioni in orbita medio-bassa. In tali fasce orbitali (da 300 km a poco meno di 1000 km di altezza), infatti, la robustezza richiesta ai componenti a bordo satellite è meno critica grazie alla protezione dovuta al Campo Magnetico Terrestre che, come difende la vita sulla Terra dalle radiazioni particellari provenienti dal sole e dal cosmo, così protegge i componenti elettronici e le strutture che orbitano in tale fascia. Questo consente di partire da

prodotti terrestri COTS (Commercial Off-The-Shelf) o consumer di alta qualità che con costi e tempi contenuti possono essere qualificati per lo spazio o spazializzati.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

Come già brevemente illustrato a fine del paragrafo precedente, la comunità industriale, sostenuta da quella accademica e di ricerca, coinvolta nelle tecnologie ottico-fotoniche sta da tempo lavorando e investendo su tali tecnologie supporta concretamente dalle Agenzie spaziali, come quella italiana ASI, e europee in generale. Oltre a ciò si stanno creando forti e necessaire sinergie tra temi tecnologici fino a poco tempo fa disgiunti tra loro: questo, spesso, causava la dispersione dei finanziamenti ma anche delle iniziative stesse.

Oggi si è raggiunta la giusta consapevolezza di quanto lo spazio stia diventando una forte opportunità per il mercato e per l'incremento dei servizi verso il cittadino ovunque esso si trovi.

In Figura 4 è riproposto lo schema che era già stato pubblicato nella scorsa edizione de Le Innovazioni del prossimo Futuro[8] e che rappresentava un possibile modello di cooperazione tra enti di ricerca e produttivi con le istituzioni finanziatrici, per generare e gestire un "circolo virtuoso" in gradi di portare in un tempo ragionevole a sviluppi concreti dele tecnologie ottico-fotoniche.



Figura 4 : Roadmap di sviluppo collaborativo per la tecnologia ottico-fotonica (Fonte: V. Schena)

E bene! Tale obiettivo, ora, lo si sta concretizzando!

[8] *Tecnologie Prioritarie per l'Industria 2020, SETTORE SPAZIO, Tecnologia Prioritaria N. 24: "Ottica e Fotonica per lo Spazio: la Nuova Frontiera per Innovare alla Velocità della Luce", Tecnologia a cura di Vincenzo Schena; volume a cura di Airi, Roma, Agra Editrice, 2020*

L'Agenzia Spaziale Italiana già per la Ministeriale 2022 (CMIN22) ha stanziato un congruo finanziamento per le tecnologie ottico-fotoniche e in particolare per il Frame ARTES 4.0 HydRON-ScyLight. Oltre a ciò a supportato anche altre tecnologie complementari a quelle di HydRON che meglio indirizzano oggi lo sviluppo della rete HydRON Mission dotandola, in prospettiva futura, di un robusto protocollo di rete trasversale con le reti terrestri (5G Non-Terrestrial-Network o NTN) e dotato di sicurezza informatica (cybersecurity) al passo con i tempi e con le nuove tecnologie come il Post Quantum Cryptography (PQC) e il Quantum Key Distribution (QKD).

E' necessario e fondamentale che questo continui anche con la prossima Ministeriale 2025 (CMIN25) incrementando, il budget stanziato rispetto a quello della CMIN22 e portandolo dai circa 50 M€ della CMIN22 per ScyLight ad arrivare ai 100 M€ se n on di più

Accrescere ulteriormente la sensibilità delle nostre Istituzioni Nazionali ed Europee è necessario e quasi urgente, visto il nuovo e inaspettato scenario politico internazionale che sta evidenziando quanto l'Europa e i sui Stati Membri debbano continuare ad accrescere la loro consapevolezza di essere sempre di più autonomi da altre parti del mondo, affermando in modo più incisivo e efficace la Sovranità Tecnologica Europea e Italiana in particolare.

Non si dimentichi la Storia Millenaria dell'Europa e quanto oggi la sua cultura, ingegnosità e capacità tecnico-ingegneristiche siano un suo "fiore all'occhiello" in grado di competere senza paura per migliorare il nostro futuro di italiani, quello dell'Europa e contribuire fortemente a quello del mondo intero.

GESTIONE E TRASMISSIONE DATI AD ALTISSIMA VELOCITÀ PER LE MISSIONI DI OSSERVAZIONE DELLA TERRA

Le missioni di corrente e futura generazione per l'Osservazione della Terra (sia ottiche che radar) richiedono *performance* sempre più sfidanti in termini di capacità di osservazione e della relativa risoluzione e conseguentemente in termini dei volumi dati prodotti. Seguendo l'evoluzione delle caratteristiche delle missioni e quindi degli strumenti, i sistemi per l'acquisizione, la memorizzazione e la trasmissione verso Terra dei dati prodotti dai sensori stessi stanno migrando verso soluzioni sempre più performanti.

È diventato infatti strettamente necessario l'utilizzo di sistemi digitali di memorizzazione capaci di gestire ingenti quantità di dati ed operare con throughput ingresso uscita particolarmente elevati. I grandi volumi di dati in gioco richiedono inoltre un conseguente aumento della capacità dei sistemi trasmissivi di bordo per il trasferimento dei dati acquisiti verso Terra.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Gli attuali sistemi di acquisizione e trasmissione dati, tenendo conto dei parametri di risoluzione sempre più spinti che vengono richieste sia ai sensori ottici che a quelli radar, 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
  - utilizzo di interfacce dati veloci avanzate (cioè Space Fiber)
- Sistemi di trasmissione avanzati:
  - modulatori ad altissimo data rate operanti in Banda-X, Ka e Q, con tecniche di

modulazione ad alto ordine e codifica variabile e/o adattativa
- antenne puntabili in Banda-Ka e Q
- amplificatori allo stato solido ad alta efficienza.

STATO DELL'ARTE

Per i sistemi di memorizzazione di bordo la migrazione verso NAND Flash è ormai diventata base di partenza del progresso tecnologico poiché questa soluzione consente la gestione di elevate capacità di storage con ingombri e consumi di potenza contenuti.
In particolare, tale tecnologia presenta le seguenti caratteristiche:
- Grandi capacità di memoria:
  - fino a 256 Gbit per device
  - lo stacking dei device 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 funzionali e circuitali, le principali caratteristiche delle *NAND Flash* da tenere propriamente in considerazione e da gestire opportunamente sono le seguenti:
- *Tecniche di accesso alla memoria*: le FLASH prevedono un accesso per pagine, non permettendo un accesso casuale come per le SDRAM.
- *Numero dei cicli di scrittura:* limitato rispetto alla tecnologia precedente delle SDRAM. Particolare attenzione deve essere posta nella gestione del fenomeno di memory wearing: senza opportune strategie di compensazione, 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.

Passando invece alla gestione delle altissime velocità di ingresso e uscita dei sistemi di memorizzazione e gestione dati, rivestono un ruolo fondamentale le soluzioni tecnologiche per l'implementazione delle interfacce di ingresso e uscita.
Nell'ultimo periodo l'utilizzo di data bus paralleli è stato soppiantato dall'introduzione di interfacce seriali ad alta velocità con il doppio beneficio di incrementare le velocità di trasferimento dati e ridurre il numero di linee elettriche necessarie all'implementazione fisica. La tecnologia di riferimento in questo senso è basata su *High Speed Serial Link* (ad es. *Wizardlink*), tuttora impiegata nelle missioni di Osservazione della Terra a breve/medio termine. Questa tecnologia ha garantito importanti riduzioni di massa dell'*harness* e alte prestazioni in termini di velocità sostenibili (fino a 2Gbps per *link*).
Data la tendenza ad avere sempre più alte velocità di trasferimento, bassi consumi, più agevole gestione dei relativi protocolli e ulteriore riduzione delle linee fisiche di interconnessione, la migrazione verso nuove tecnologie si rivela sempre più necessaria. Una delle tecnologie più promettenti in questo senso è sicuramente lo *Space Fiber*, che permetterà di gestire velocità fino a 6 Gbps e di operare 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 *performance* 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 d'isolamento tra le due polarizzazioni simultaneamente utilizzate (*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.

Il passo successivo per il miglioramento delle prestazioni trasmissive delle future missioni di Osservazione della Terra è stato nell'ultimo periodo operare a più alte frequenze, dove è disponibile una maggiore quantità di banda riservata alla trasmissione dati (Banda-Ka: 25.5 GHz - 27 GHz, Banda-Q: 37.5 – 40.5 GHz).
La Banda-X (8.025 GHz – 8.4 GHz) offre, infatti, una banda abbastanza limitata al fine di poter sostenere velocità di trasmissione più alte di 1000 Mbps ed inoltre presenta ormai un alto livello di congestionamento.

La migrazione verso la Banda-Ka (e in prospettiva verso la Banda-Q), pur rendendo disponibile una maggiore quantità di banda, introduce importanti problemi di propagazione, legati alla notevole attenuazione del segnale nell'attraversamento dell'atmosfera. Tipicamente il valore target di disponibilità del collegamento richiede l'impiego di un'antenna steerable per garantirne la raggiungibilità.
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 *Adaptative 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 *performance* in termini di velocità di trasmissione.

È attualmente in corso lo sviluppo di sistemi in Banda-Ka in doppia polarizzazione, con capacità di raggiungere *target performance* fino a 8 Gbps.
La massimizzazione effettiva del *data throughput* medio in *downlink* trova, inoltre, nel concetto di ritrasmissione 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 impiegando una stazione 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 è inserita di fatto la necessità di elementi tecnici e tecnologici, sia a bordo che a Terra, atti alla gestione coerente della ritrasmissione dei dati non correttamente ricevuti come definiti nel protocollo CFDP (*CCSDS file delivery protocol*), dove i meccanismi di ritrasmissione sono specificati e che consente quindi la gestione coerente dell'acquisizione di un set di dati (file, immagine, ecc ...) in intervalli temporali successivi. A bordo l'entità CFDP viene implementata nella unità di *storage* dei dati e sta rappresentando un ulteriore elemento di sviluppo tecnologico dei moduli di memoria ad alta velocità e capacità basati su tecnologia *NANO FLASH*.
Al fine di supportare adeguatamente i demanding rate di downlink richiesti e le tecniche di trasmissione in doppia polarizzazione, viene previsto attualmente l'impiego di antenne altamente direttive a fascio puntabile, con elevate performance in termini di cross polar discrimination.
Sul fronte della trasmissione a Radio Frequenza, nel caso di dispositivi di potenza allo stato solido, è necessario considerare l'utilizzo di dispositivi *Gallium Nitride* (GaN), viste le caratteristiche di compattezza ed alta efficienza rispetto ad altre tecnologie. In Italia sono in corso diverse iniziative per lo sviluppo degli ele

menti 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: per i modulatori sono in corso sviluppi relativi all'utilizzo degli schemi di modulazione e tecniche di codifiche avanzate in Banda-X.

Ulteriori sviluppi sono in corso anche in Europa ed includono, ad esempio, iniziative relative alle tecnologie per le memorie di massa ad alte performance, per modulatori ed amplificatori in Banda-X, Ka e Q, nonché per antenne puntabili, compatibili con i segnali ad alto ordine di modulazione e che supportano l'uso simultaneo delle due polarizzazioni. In termini di interfacce dati ad alta velocità ed in coerenza con l'evoluzione tecnologica in corso, è inoltre diventato di riferimento lo standard spaziale europeo Space Fiber.

COMUNICAZIONI QUANTISTICHE

La comunicazione quantistica è una delle tecnologie più innovative nell'ambito delle telecomunicazioni. Essa rappresenta un cambio di paradigma nell'approccio alla trasmissione dei dati e nell'uso delle proprietà del mezzo stesso di comunicazione.

La comunicazione classica, che ha come scopo quello di permettere a due utenti di scambiare informazioni, si basa su unità di informazione, i *bit*, il cui valore può essere 0 o 1. I bit vengono trasmessi tra due utenti per mezzo di un canale di comunicazione (ad esempio un collegamento in aria, una fibra ottica), in cui un mezzo fisico (ad esempio un'onda elettromagnetica) trasporta i bit che vengono "impressi" su una grandezza fisica trasportata dal mezzo stesso. Per distinguere i valori logici 0 ed 1 vengono stabilite soglie sulle suddette grandezze fisiche. Ad esempio, un valore di tensione nei circuiti elettronici oppure un valore di potenza ottica in caso di comunicazioni in fibra ottica.

La comunicazione quantistica non ha come scopo quello di scambiare delle informazioni nel senso delle comunicazioni classiche, ma quello di trasferire un nuovo tipo di unità informativa, il *qubit* (*quantum bit)*. I qubit possiedono proprietà estremamente peculiari, che aprono la porta ad una serie di applicazioni non riproducibili con dispositivi classici. Un *qubit,* come un *bit*, può assumere un valore pari a 0 o 1 ma, differentemente dai bit classici, può trovarsi anche in una combinazione (o sovrapposizione) di stati, ovvero *contemporaneamente* nello stato corrispondente al valore 0 e a quello corrispondente al valore 1. Inoltre, coppie di qubit possono esistere in uno stato detto entangled, ovvero possono condividere una correlazione "non locale", incredibilmente forte e peculiare, che non ha analogo nei *bit* classici, in cui il risultato di una misura su uno dei due qubit determina univocamente lo stato dell'altro, senza che su di esso venga effettuata alcuna operazione.

Tali proprietà, quelle di *sovrapposizione degli stati* e dell'*entanglement* permettono il raggiungimento di funzionalità altrimenti non accessibili con l'utilizzo di *bit*

classici. È importante notare che lo scopo delle comunicazioni quantistiche non è quello di rendere lo scambio di informazioni più veloce o efficiente, e dunque sostituirsi alle comunicazioni classiche, ma affiancarsi ad esse per ampliare lo spettro di possibilità raggiungibili. Inoltre, le comunicazioni quantistiche richiedono la presenza di un canale di comunicazione classica parallelo su cui scambiare delle informazioni necessarie alla realizzazione dei protocolli quantistici. Infatti, tutti i protocolli quantistici richiedono sempre una parte di post-processamento classico che permette di interpretare correttamente i risultati ottenuti dal canale di comunicazione quantistico.

Le proprietà quantistiche dei *qubit* sono alla base di protocolli di comunicazione quantistica che permettono, ad esempio, di raggiungere il massimo livello di sicurezza possibile nelle comunicazioni (*protocolli di crittografia quantistica*) o di connettere computer quantistici distribuiti in diversi punti del mondo (protocolli di *entanglement distribution e quantum teleportation*).

Le comunicazioni quantistiche permettono di raggiungere obiettivi altrimenti impossibili, primo fra tutti la possibilità di realizzare protocolli di crittografia *Information Theoretically Secure* (ITS), ovvero protocolli resistenti ad avversari con infinita capacità computazionale. Un protocollo ITS è sicuro nei confronti di future evoluzioni nelle capacità di calcolo, garantendo una sicurezza assoluta. Gli attuali protocolli di crittografia simmetrica e asimmetrica, si basano sul crittografare messaggi tramite l'utilizzo di una chiave che viene scambiata tra gli utenti in maniera sicura e sconosciuta ad eventuali terzi intenzionati a violare la segretezza della comunicazione. La crittografia asimmetrica, a chiave pubblica-privata, fornisce il più elevato livello di sicurezza allo stato dell'arte. Le chiavi vengono scambiate per mezzo di protocolli *Computationally Secure* (esempi sono i protocolli RSA, *Diffie-Hellman* e a curve ellittiche ECC), in cui la sicurezza si basa sul fatto che per effettuare l'operazione di fattorizzazione in numeri primi necessaria per ottenere la chiave, un intercettatore, anche utilizzando i più performanti computer moderni, impiegherebbe un tempo di computazione estremamente

lungo rendendola di fatto non utilizzabile. Sebbene questo tipo di sicurezza sia attualmente sufficiente per garantire comunicazioni sicure, non assicura che in un (non così lontano) futuro vengano sviluppate tecnologie in grado di ridurre drasticamente i tempi di computazione. Un esempio lampante sono i computer quantistici in rapido sviluppo negli ultimi anni soprattutto grazie a grandi investimenti da parte di aziende tech quali IBM, Microsoft, Google. Un computer quantistico, infatti, permetterebbe di ottenere facilmente una chiave per mezzo dell'algoritmo di Shor (e non solo), in grado di trovare i fattori primi di un intero in tempo polinomiale. Visto lo sviluppo dei computer quantistici, sono in atto sforzi globali per la realizzazione di protocolli di scambio di chiave quantistici (*Quantum Key Distribution,* QKD) che permettono di raggiungere un livello di sicurezza idealmente inviolabile che sia basato su principi fisici e non sulle attuali capacità computazionali. Tali protocolli QKD sono complemento alla classe dei nuovi protocolli e algoritmi identificati come *Post Quantum Cryptography* che, sebbene basano la loro sicurezza su principi fondamentali della fisica come i sistemi QKD, sono ideati a partire da problemi ad elevato carico computazionale che sono di difficile risoluzione anche per elaboratori quantistici.

I principali protocolli QKD si realizzano tramite lo scambio di qubit in stati di sovrapposizione (protocolli *Prepare and Measure*, P&M), ma anche tramite la distribuzione di coppie di *qubit entangled* agli utenti (protocolli *Entanglement Based, EB*).

La trasmissione di *qubit* è realizzata tramite l'utilizzo di fotoni, singole particelle di luce il cui comportamento è pienamente descritto dalla meccanica quantistica. I fotoni possono essere trasmessi in due modi diversi, tramite fibra ottica o tramite collegamenti *free-space* (propagazione libera). Nel primo caso il mezzo utilizzato garantisce un'ottima stabilità del segnale trasmesso ma al contempo presenta delle perdite (tipicamente 0.2dB/km) che limitano la distanza tra i due utenti ad un massimo di qualche centinaio di km. Tale limite nasce dal fatto che lo stato di un singolo fotone, per principi di meccanica quantistica, non può essere copiato e quindi il segnale non può essere amplificato per permettere un aumento nella

distanza di trasmissione (proprietà alla base di protocolli di crittografia quantistica). Per questo motivo le connessioni su fibra sono utilizzate per coprire zone cittadine o regionali. Le connessioni a lunga distanza sono invece coperte tramite collegamenti free-space satellitari. Le perdite dovute alla propagazione in atmosfera, infatti, sono molto minori (su distanze elevate) di quelle legate alla propagazione in fibra permettendo quindi di collegare punti molto distanti tramite un nodo satellitare.
L'utilizzo combinato di reti a copertura cittadina/regionale e di segmenti spaziali a copertura globale permettono la realizzazione di un *internet quantistico*, ossia un network mondiale su cui implementare protocolli di comunicazione quantistica.

Lo spazio, analogamente al ruolo svolto per le telecomunicazioni classiche, gioca quindi un ruolo fondamentale per la realizzazione di infrastrutture globali per la realizzazione di servizi di QKD e di reti quantistiche. Per raggiungere tali obiettivi sono necessarie soluzioni sistemistiche e tecnologie chiave che siano compatibili con le condizioni spaziali.

Un sistema per la realizzazione di un servizio QKD satellitare consiste di un satellite, tipicamente in orbita bassa (*Low Earth Orbit*, *LEO*), e varie stazioni ottiche di terra (*Optical Ground Station, OGS*) distribuite nell'area di servizio, potenzialmente ad estensione globale (Figura 1).

Il satellite, quando in condizioni di visibilità, stabilisce un collegamento ottico con una prima stazione di terra, OGSA. Una sessione di protocollo QKD viene instaurata tramite l'utilizzo di due fasci ottici, uno dedicato alla trasmissione dei *qubit* e uno dedicato alla trasmissione di dati classici per lo scambio di dati protocollari. Una volta concluso lo scambio sia il satellite che la OGSA sono in possesso della stessa chiave kA.
Lo stesso satellite, quando in visibilità di una seconda stazione di terra, OGSB, instaura un nuovo collegamento ottico per realizzare una seconda sessione QKD. Una volta concluso lo scambio, sia il satellite che la OGSB sono in possesso della

stessa chiave kB.
Il satellite, in possesso sia di kA che di kB, può criptare la chiave kA tramite la chiave kB implementando una operazione di XOR bit a bit (criptazione tramite *One Time Pad, OTP*). Tale stringa criptata viene comunicata alla OGSB tramite un canale di comunicazione classica. Una volta in possesso della stringa criptata, la OGSB decripta tale stringa utilizzando la chiave kB in suo possesso, riottenendo quindi la chiave kA. In questo modo sia la OGSA che la OGSB sono in possesso della stessa chiave kA che può quindi essere usata per scopi criptografici. I dati cifrati tramite la chiave kA condivisa possono essere scambiati attraverso un qualunque sistema di comunicazione sia di tipo satellitare che terrestre.
Solitamente il sistema è progettato in modo tale che il satellite agisca come trasmettitori di stati quantistici e la OGS come ricevitore. Tale scelta è dovuta alle minori perdite che sono presenti su link ottici in *downlink* rispetto a quelli in *uplink*.

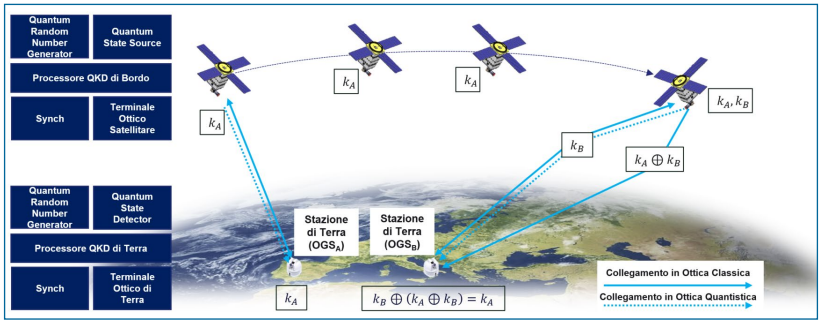


Figura 1: Esempio di missione satellitare QKD in cui il satellite permette a due stazioni di terra (OGS), arbitrariamente lontane una dall'altra, di condividere una chiave di cifrature con cui criptare le comunicazioni

Per la realizzazione di protocolli QKD sono di vitale importanza le seguenti tecnologie:

• ***Sorgenti di singoli fotoni*** (quantum state source) che permettono la generazione di singole particelle di luce caratterizzate da stati quantistici, i *qubit*. Un esempio di sorgente di fotoni *entagled* realizzata in laboratorio è mostrato in Figura 2.

• ***Rilevatori di singoli fotoni (quantum state detector)*** in grado di misurare la presenza di fotoni. Ciò, infatti, non è possibile con strumenti ottici standard vista l'estrema esiguità del segnale.

• ***Dispositivi elettronici*** in grado di guidare e coordinare i dispositivi quantistici.

• ***Terminali ottici a bordo del satellite e a terra*** in grado di instaurare il collegamento ottico quantistico per il trasferimento dei qbit e il collegamento in ottica classica per lo scambio dei dati necessari per l'esecuzione dei protocolli quantistici.

• ***Processore a bordo del satellite e a terra*** in grado di elaborare i dati delle misure quantistiche per la realizzazione del protocollo (post-processamento) e di generare e rendere disponibili le chiavi crittografiche a coppie di stazioni a terra.

• *Quantum Random Number Generator (QRNG)*, dispositivo che utilizzando i fotoni come mezzo per realizzare qubit, permette di generare sequenze di bit assolutamente casuali e con una distribuzione uniforme con cui pilotare la sorgente per la generazione degli stati quantistici dei fotoni da trasmettere. I QRNG permettono di superare la limitazione computer o schede elettroniche che possono generare numeri solo in maniera pseudo-casuale per mezzo di algoritmi deterministici.

• ***Tecnologie ottiche ed elettroniche*** che implementano soluzioni per compensare la degradazione sul collegamento ottico dovute alla presenza dell'atmosfera e ai suoi effetti di attenuazione, scintillazione, turbolenza ecc.

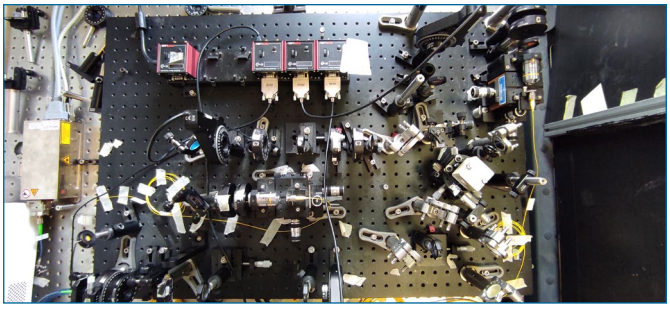


Figura 2: Sorgente di Fotoni Entangled realizzata nei Quantum Lab dell'Università Sapienza e utilizzata nello Space Photonic Quantum Research (SPQR) Laboratory di Thales Alenia Space Italia per attività di test

Passo successivo alla realizzazione di protocolli crittografici è la realizzazione di reti quantistiche in grado di collegare più utenti in maniera sicura. Tali reti quantistiche permetteranno anche di collegare computer e sistemi quantistici, grazie al trasferimento di stati quantistici e alla distribuzione di stati ***entangled*** su grandi distanze per mezzo di protocolli di *quantum teleportation*. Ciò permetterebbe di svolgere compiti complessi in modo distribuito.
Il passaggio a reti quantistiche realizzate per mezzo di nodi satellitari richiede in aggiunta alle medesime tecnologie abilitanti necessarie per i link QKD, l'introduzione di ulteriori tecnologie chiave, quali:

- ***Sorgenti di fotoni entangled*** che permettono la generazione di coppie di fotoni con stati quantistici correlati. Questa proprietà di entanglement è necessaria per i protocolli di quantum teleportation.
- ***Memorie quantistiche*** che permettono il salvataggio su di un mezzo fisico di uno stato quantistico (senza crearne una copia) per un tempo limitato, necessarie per l'implementazione dei protocolli di quantum teleportation.

Al momento lo sviluppo delle memorie quantistiche costituisce il principale collo di bottiglia per la realizzazione di reti quantistiche in quanto la tecnologia non è ancora abbastanza matura.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Le comunicazioni quantistiche rappresentano una delle frontiere più avanzate della tecnologia moderna, e i sistemi satellitari costituiscono un elemento imprescindibile per il loro sviluppo. Le motivazioni alla base dello sviluppo di questa tecnologia sono molteplici e spaziano dalla necessità di proteggere le informazioni sensibili alla possibilità di creare reti dispositivi quantistici distribuiti su tutto il pianeta.

Una delle principali ragioni per cui lo sviluppo delle comunicazioni quantistiche sta attirando notevoli investimenti a livello mondiale è il livello di sicurezza senza

precedenti che queste ultime possono offrire. Come menzionato precedentemente infatti, le tecniche di crittografia tradizionale sono e saranno sempre più esposte all'avvento di calcolatori quantistici. Le comunicazioni quantistiche offrono una soluzione per la creazione di reti di comunicazioni sicure tramite tecniche di crittografia quantistica, intrinsecamente resistenti ai computer quantistici. Tra queste, la QKD rappresenta la tecnologia più matura, con diversi sistemi commerciali per la sua realizzazione su reti di terra già presenti sul mercato ed un costante sviluppo per applicazioni spaziali che viene sostenuto sia a livello istituzionale che commerciale.

Un'altra motivazione cruciale per lo sviluppo delle comunicazioni quantistiche è la possibilità di collegare nativamente tra loro dispositivi quantistici, quali computer e sensori quantistici creando una *Quantum Information Networks (QIN)* al fine migliorane prestazioni e capacità, nonché creare una rete di dispositivi interconnessi. Le reti di comunicazioni quantistiche permetteranno infatti la risoluzione di problemi in maniera distribuita connettendo più computer quantistici (ognuno ottimizzato per svolgere delle operazioni specifiche) dislocati in aree del globo molto lontane; questi ultimi, collegati a simulatori e sensori quantistici, consentiranno capacità di analisi senza precedenti per la risoluzione di problemi in totale sicurezza. In ambito industriale, un certo numero di attori ha già espresso il proprio interesse nell'utilizzare le capacità di calcolo quantistico distribuito, sfruttando le capacità di questi computer per risolvere problemi di ottimizzazione relativi al loro settore di attività o per rappresentare più accuratamente i sistemi fisici di interesse. Alcuni esempi di applicazioni in questo ambito sono costituiti dal settore automobilistico/aeronautico per l'ottimizzazione dei modelli a elementi finiti e dall'industria farmaceutica per la simulazione di molecole grandi e complesse. Oltre a questi settori industriali, c'è un grande interesse anche da parte dei fornitori di capacità di calcolo ad alte prestazioni *(High Performance Computing, HPC)*, i quali saranno in grado di offrire servizi di HPC quantistico all'industria per la risoluzione di problemi analoghi a quelli sopracitati, attraverso interfacce adattate. Per poterlo fare, i fornitori di HPC dovranno necessariamente distribuire

compiti di calcolo su diverse macchine al fine di sfruttare più risorse di elaborazione e avranno quindi necessità di infrastrutture di comunicazioni quantistiche che permettano a questi dispositivi di comunicare.

Lo spazio offre una grande opportunità per portare rapidamente le comunicazioni quantistiche su scala globale e rappresenta un elemento indispensabile anche per il supporto dello sviluppo delle reti (metropolitane) terrestri, garantendone l'interconnessione. L'utilizzo di infrastrutture satellitari permette infatti la trasmissione di segnali quantistici su lunghe distanze, superando le limitazioni intrinseche delle comunicazioni ottiche terrestri in fibra (le cui distanze massime raggiungibili sono dell'ordine delle centinaia di chilometri), aprendo la strada a un'infrastruttura di comunicazione sicura e globale basata su tecnologie quantistiche. Ovviamente, ci sono ancora numerose sfide ingegneristiche per la realizzazione di costellazioni e satelliti per le comunicazioni quantistiche ed è per questo motivo che Thales Alenia Space Italia come *large system integrator* supporta in prima linea lo sviluppo di una filiera italiana per incrementare la maturità delle tecnologie abilitanti.

STATO DELL'ARTE

Lo sviluppo di sistemi per la comunicazione quantistica sta vivendo un periodo di forte sviluppo. A seguito delle prime dimostrazioni sperimentali avvenute nei primi anni 2000, soprattutto focalizzate sull'implementazione di collegamenti QKD punto-punto terrestri su fibra, l'attenzione sui sistemi di comunicazione quantistica si è ampliata per investigare anche soluzioni in spazio libero sia terrestre che satellitare. Diversi Stati sia in Europa che in contesto mondiale, così come Istituzioni e Agenzie quali la Commissione Europea e l'Agenzia Spaziale Europea e l'Agenzia Spaziale Italiana, hanno aperto diverse linee di finanziamento tese a supportare la realizzazione di reti di comunicazione quantistica.

Attraverso la partecipazione a progetti internazionali e nazionali l'Italia è riuscita negli ultimi anni ad accrescere e consolidare capacità, competenze e sviluppi

tecnologici nelle comunicazioni quantistiche rafforzando e posizionando in ruoli chiave tutta la filiera nazionale industriale e accademica.

A livello europeo uno dei principali progetti nell'ambito delle comunicazioni quantistiche è l'*European Quantum Communication Infrastructure (EuroQCI)*. Il progetto, finanziato dalla Commissione Europea (CE), si pone l'obiettivo di realizzare una rete di comunicazione quantistica che colleghi i 27 Sati Membri. La rete EuroQCI è composta da due segmenti, uno di terra e uno di spazio. Il segmento di terra abiliterà le comunicazioni quantistiche a corto raggio all'interno di *Quantum Metropolitan Area Networks (QMAN)* in un intorno di circa 100-200 km di distanza mentre il segmento spazio realizzerà collegamenti trans-nazionali e tra QMAN senza limitazioni sulle distanze massime da coprire.

Il segmento spazio della rete EuroQCI è in fase di sviluppo nell'ambito del progetto *Secure and Cryptographyc system* (SAGA) finanziato dall'Agenzia Spaziale Europea (ESA) che ha come scopo la realizzazione di un sistema satellitare basato su una costellazione di satellite in orbita bassa, sicuro, certificato e accreditato in grado di implementare il protocollo di *Quantum Key Distribution (QKD*) con delle *Optical Ground Stations (OGS)* distribuite sul suolo europeo. La fase A del progetto è stata condotta da Thales Alenia Space Italia come prime *contractor* di uno dei tre consorzi cui è stato affidato lo studio del sistema. Thales Alenia Space Italia sta attualmente conducendo con il ruolo di prime *contractor,* la fase B1 del progetto della prima generazione del sistema SAGA che porterà nelle fasi successive allo sviluppo e al lancio del primo satellite e allo sviluppo e al dispiegamento del relativo segmento di terra. La filiera industriale italiana è bene rappresentata nel progetto grazie alla partecipazione di realtà di primo piano nell'area delle comunicazioni satellitari e ottiche/quantistiche come Think Quantum, Officina Stellare, Telespazio e Leonardo.

Il segmento di terra EuroQCI sarà composto da una confederazione di reti nazionali la cui integrazione rappresenterà la rete europea. In tale contesto, il progetto

QUID (Quantum Italy Deployement) si pone l'obiettivo di realizzare la rete terrestre di comunicazione quantistica italiana all'interno della rete EuroQCI. Il progetto QUID, guidato da Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRiM), è finanziato dalla Commissione Europea e ha una durata di 30 mesi.
La rete prevedrà la realizzazione di diverse *Quantum Metropolitan Areas (QMAN)* nelle principali città italiane (Milano, Torino, Padova, Trieste, Firenze, Roma, L'Aquila, Napoli) e diversi collegamenti "long-haul" via satellite, che permettono di collegare tali QMAN a punti strategici (come ad esempio il centro di controllo del Fucino di Telespazio e il centro di geodesia di Matera) e ai nodi della *Italian Quantum Backbone (IQB)*, una fibra ottica che parte da Torino e arriva fino a Matera completamente dedicata all'implementazione di esperimenti di comunicazione quantistica, presso Venezia, Bologna, Matera (Figura 3).
Thales Alenia Space Italia partecipa al progetto QUID, insieme ad una folta rappresentanza del mondo industriale e accademico italiano, mettendo a disposizione il proprio laboratorio *Space Photonic and Quantum Research (SPQR) Laboratory* come nodo della QMAN di Roma che fornirà anche l'accesso alla IQB. Il progetto prevede anche la connessione dell'SPQR Lab ai Quantum Lab di Leonardo siti in Via Tiburtina sia tramite un collegamento in spazio libero della lunghezza di circa 300m sia tramite un collegamento diretto in fibra ottica tra i due laboratori.
Tra i partecipanti al progetto figurano le Università di Padova, L'Aquila, La Sapienza di Roma, Federico II di Napoli, Trieste e il Politecnico di Milano; varie startup attive nello sviluppo di tecnologie quantistiche come ThinkQuantum, QTI e Cohaerentia; e grandi aziende, agenzie e centri di ricerca con un ruolo fondamentale nella realizzazione di sistemi di comunicazione quali Telespazio, Telecom, Telsy, ASI, CNR e Top-IX.

Altro progetto attualmente in corso a livello europeo è Eagle1. Il progetto, a guida SES e con una discreta partecipazione italiana, è finanziato dall'Agenzia Spaziale Europea e prevede lo sviluppo di un satellite dimostratore puramente tecnologico, che ha come scopo la dimostrazione in orbita della tecnologia QKD.



Figura 3: La Rete Italiana per Comunicazioni Quantistiche (Italian Quantum Backbone) (fonte: https://quid-euroqci-italy.eu/it/)

Oltre ai progetti su menzionati, un intero ecosistema di progetti europei con un'ampia partecipazione della filiera italiana è attualmente in corso con lo scopo di incrementare il livello di maturità (*Technology Readiness Level, TRL*) delle tecnologie quantum abilitanti per uso nelle infrastrutture spaziali. In tale contesto compaiono il progetto *QuDICE (QUantum DevIces and subsystems for Communications in spacE)* e *LaiQA (Leap in Advancing of crItical Quantum key distribution-spAce components)*, ambedue finanziati dalla Commissione Europea. L'obiettivo di questi progetti è sostenere la progettazione e lo sviluppo di tecnologie critiche QKD, migliorando la loro maturità fino a un livello TRL di 5-6. Questo include sorgenti QKD a variabili discrete, sorgenti QKD a variabili continue, sorgenti di fotoni *entangled* (sia *bulk* che in fotonica integrata), sorgenti di singolo fotone, *Quantum Random Number Generators (QRNG)*, terminali ottici di bordo, sistemi di ottica adattativa a terra, memorie quantistiche e simulatori/emulatori di quantum

networks e di sistemi QKD.
Thales Alenia Space Italia partecipa a tali progetti apportando la sua competenza sistemistica con l'obiettivo di permettere la completa transizione della sperimentazione tecnologica alle applicazioni nelle infrastrutture e negli asset spaziali. In ambedue i programmi è prevista la definizione della *roadmap* per il raggiungimento del TRL 9 per le tecnologie indirizzate. La rappresentanza italiana in QuDICE è completata con la partecipazione di ThinkQuantum, Stellar Project e Argotec e dall'Università di Padova.

A livello nazionale, l'Italia sta conducendo varie iniziative per stimolare la crescita di competenza e maturazione delle tecnologie spaziali per le comunicazioni quantistiche, iniziative che coinvolgono tutti gli attori della filiera attivi nel settore quali Università ed Enti di Ricerca, Piccole e Medie Imprese, Start-up e naturalmente la Grande Industria. La maturità delle tecnologie e le sfide specifiche del settore spazio richiedono un coordinamento ed un orientamento per garantire la sostenibilità delle soluzioni e al contempo garantire che l'Italia abbia competenze e autonomia per realizzare le proprie infrastrutture quantistiche.

Thales Alenia Space Italia, per il contesto applicativo spaziale, interpreta anche in tal senso il proprio ruolo nell'ambito di una strategia per l'utilizzo delle tecnologie quantistiche per l'evoluzione delle infrastrutture e delle soluzioni di comunicazione satellitare che richiedono:

- Lo sviluppo di un network di partnership e di una filiera.
- Un coinvolgimento nello sviluppo tecnologico fina dalle prime fasi della ricerca per assicurare maggiori possibilità di successo nel trasferimento al settore spaziale.
- Lo sviluppo di proprie competenze e infrastrutture di ricerca e di produzione.

Tale strategia si è sviluppata nel corso degli ultimi anni con azioni concrete mirate a sostenere le *roadmap* interne ed il loro raccordo con le priorità Istituzionali Italiane ed Europee; in particolare Thales Alenia Space Italia è stata promotrice di un

raggruppamento di attori dell'Industria e della Ricerca (CNR, Fondazione Bruno Kessler Gran Sasso Science Institute, INRIM, INFN, Sapienza, Politecnico di Milano, Università di Padova, Università di Pavia, Università di Trieste, Università di Trento, GARR, Competence Center Cyber 4.0, Leonardo, Telespazio, ThinkQuantum, Quantum Telecommunications Italy, Northrop Grumman Italia) che nel 2021 hanno sottoscritto un *Memorandum of Understanding* finalizzato alla collaborazione in progetti di ricerca e sviluppo sulle tecnologie quantistiche per lo Spazio, non soltanto per le telecomunicazioni.

Sul fronte delle capacità interne Thales Alenia Space Italia ha creato lo *Space Photonics and Quantum Research (SPQR)* Laboratory: un'infrastruttura di grande rilevanza per la strategia industriale in generale e per le attività di Ricerca e Sviluppo nell'area delle comunicazioni e delle tecnologie quantistiche e ottiche. Il laboratorio, il cui nucleo originario è stato sviluppato grazie al del progetto *Quantum Communication and Synchronization TestBed (QCS-TB)* finanziato da parte dell'Associazione Cyber 4.0 con fondi MIMIT e sviluppato in collaborazione con (INRIM, Sapienza, Telespazio e MPD), ha visto una notevole espansione nel corso degli anni al punto di diventare un laboratorio di ottica completamente attrezzato e funzionante e da essere utilizzato come punto di riferimento per progetti di comunicazione su comunicazioni ottiche quantistiche e classiche, per supportare lo sviluppo di tecnologie innovative come strumento a supporto delle attività di verifica e validazione delle soluzioni progettate per l'utilizzo in sistemi satellitari.

Una foto dell'infrastruttura esterna dell'SPQR Lab sito in Via Saccomuro 24 è riportata in Figura 4. Il laboratorio è direttamente collegato alla *Italian Quantum Backbone (IQB)* ed è in fase di realizzazione la stesura di una fibra ottica completamente dedicata alla comunicazione quantistica tra l'SPQR Lab e i Quantum Lab di Leonardo.

Ulteriore progetto rilevante a livello nazionale è il *National Quantum Science and Technology Institute (NQSTI)*, che si propone di sviluppare tecnologie abili-

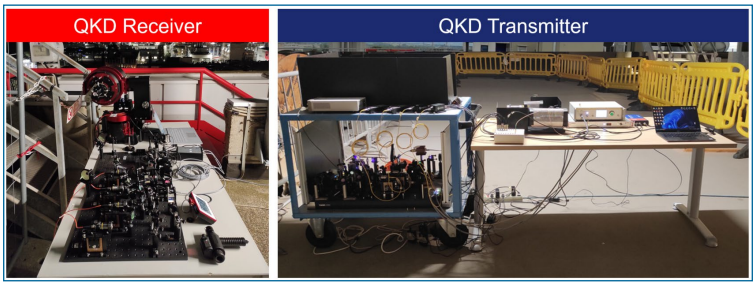


Figura 4: Foto dell'SPQR Lab sito presso l'edificio di Thales Alenia Space in Italia in Via Saccomuro 24

tanti per le comunicazioni quantistiche, ingegnerizzando tecnologie abilitanti e sviluppandone di nuove. Il Partenariato NQSTI è un consorzio a cui afferiscono venti entità accademiche e industriali, con lo scopo di sviluppare le tecnologie quantistiche in Italia. Il progetto è finanziato dal Ministero dell'Università e della Ricerca (MUR) attraverso fondi derivanti dal Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), e ha una durata di 36 mesi. Tra i vari partecipanti figurano Fondazione Bruno Kessler, Scuola Superiore Sant'Anna, Politecnico di Milano, CNR, Sapienza Università di Roma, Università di Bari e Università di Padova come rappresentanti del mondo accademico. Thales Alenia Space Italia e Leonardo partecipano al progetto come rappresentanti della grande industria italiana. Thales Alenia Space Italia in qualità di *Space Large System Integrator* guida lo sviluppo delle tecnologie affinché esse siano compatibili con future missioni spaziali, per la realizzazione di collegamenti QKD sperimentali e per la progettazione di soluzioni per reti quantistiche via satellite.

A livello extraeuropeo, diverse iniziative sono attualmente in corso per soluzioni QKD sia su fibra che via satellite. La Cina è stata precursore in questo senso avendo dato il via allo sviluppo di una rete terrestre che al momento conta quattro città (Pechino, Jinan, Shangai, Heifei) collegate tramite *trusted node*, all'interno di ognuna delle quali si sviluppa una rete di comunicazione quantistica.
Parallelamente, la Cina sta sviluppando un sistema di comunicazione quantistica via satellite tramite il progetto QUESS. Il primo satellite di tale progetto, denomi

nato Micius, è stato lanciato nel 2016 e ha dimostrato la fattibilità tecnologica di QKD long-range, collegando diverse città in Cina e facendo collegamenti anche con delle stazioni ottiche Europee situate a Vienna e a Matera (*Matera Laser Ranging Observatory, MLRO*). Un secondo satellite è stato recentemente lanciato.

Anche gli USA hanno investito in progetti di comunicazioni quantistiche realizzando la prima rete di QKD al mondo con più di tre nodi attivi contemporaneamente, la DARPA network.

Il Giappone, dopo la Cina, è probabilmente uno dei Paesi che sta investendo maggiormente nello sviluppo di reti quantistiche ed in particolare di reti QKD. Da annoverare prima fra tutti è la realizzazione di una rete QKD metropolitana nella città di Tokyo già nel 2010. Tale rete è stata realizzata nell'ambito del progetto *UQCC (Updating Quantum Criptography and Communications)* guidato dal *NICT (National Institute of Information and Communications Technology)* e che vede la partecipazione di numerosi attori sia accademici che privati quali NTT *(Nippon Telegraph and Telephone Company)*, Toshiba Corporation, ed anche partner Europei come ID Quantique e l'Università di Vienna.
La rete QKD di Tokyo è stata ingrandita nel corso degli anni e comprende link in fibra ed un link free-space. La rete viene tuttora utilizzate per dimostrare la sicurezza incondizionata della QKD in diversi contesti in cui la sicurezza e la privacy ricoprono un ruolo critico. Un esempio recente è stato l'utilizzo della rete di Tokyo per distribuire e memorizzare dati sul genoma di molti individui ed utilizzarli per trattamenti medici personalizzati, garantendo una sicurezza incondizionata. Il progetto vede la partecipazione di NICT, Toshiba e l'ospedale universitario do Tohoku.
A partire dal 2019 il MIC (*Ministry of Internal Affairs and Communications*) ha individuato la QKD come una delle tecnologie prioritarie e ha attivato un piano di sviluppo che prevede studio e sviluppo di tecnologie per la realizzazione di sistemi QKD per piccoli satelliti (CubeSats), sviluppo della tecnologia delle reti di terra e studio e sviluppo di una rete quantistica globale. Il progetto ha visto un importante successo nell'agosto del 2023 con il lancio di un dispositivo di comu-

nicazione quantistica (un trasmettitore QKD) sulla ISS (*International Space Station*) per un collegamento con una stazione di terra.

Il Regno Unito, come altri Paesi, investe numerose risorse nella realizzazione di progetti per lo sviluppo di tecnologie QKD sia di terra che satellitari. Lo sviluppo di tecnologie quantistiche ha visto un'accelerazione grazie alla creazione di un *Quantum Communications Hub* da parte del programma nazionale di sviluppo delle tecnologie quantistiche. L'hub vede la collaborazione di istituti di ricerca, università, aziende private ed enti pubblici.
Per quanto riguarda le reti terrestri, di notevole rilievo è la presenza di una rete che collega le città di Bristol e Cambridge tramite la UK *National Dark Fibre Facility (NDFF)*. Le reti di Cambridge e Bristol sono entrambe composte da quattro nodi. La rete di Cambridge vede la collaborazione dell'Università di Cambridge e Toshiba Research Europe Ltd, mentre la rete di Bristol è stata realizzata dalla collaborazione dell'Università di Bristol e ID Quantique.
La visione futura per la rete QKD vede un suo ampliamento fino a 410km collegando vari nodi (tra cui Londra) per mezzo della NDFF.
Per quanto riguarda la QKD satellitare il Regno Unito ha attualmente in sviluppo il progetto nazionale *SPOQC (Satellite Platform for Optical Quantum Communications)*, guidato dal Quantum Communications Hub. Obiettivo del progetto è la realizzazione di un *CubeSat,* con lancio previsto nel 2024, per la dimostrazione di link QKD con la stazione di terra nel campus dell'Università di Heriot-Watt nei pressi di Edimburgo in Scozia. Il progetto coinvolge vari partner accademici e privati. Il progetto SPOQC vede anche collaborazioni con progetti internazionali attraverso la sua stazione di terra. In particolare, con il progetto QEYSSat guidato dall'Agenzia Spaziale Canadese. Tale progetto prevede la realizzazione di un satellite LEO QKD in grado di realizzare collegamenti in uplink, e dunque in grado di ricevere qubit da terra.
Interessante è lo sviluppo del CubeSat *ROKS (Responsive Operations for Key Services)* per QKD da progetto finanziato dall'agenzia spaziale del Regno Unito e delle necessarie stazioni di terra. I sistemi del ROKS sono stati testati nel 2022 ed il lancio è previsto nel 2024.

PROPULSIONE E PROPELLENTI

TECNOLOGIE PER LA PROPULSIONE SPAZIALE

Lo scenario tecnologico si concentra su un portafoglio di diverse tecnologie per la propulsione spaziale:

(A) propulsione elettrica,
(B) propulsione avanzata,
(C) propulsione Ramjet
(D) propulsione Scramjet
(E) propulsione ad acqua

Il settore aerospaziale è 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, connessione direct to device, internet delle cose -IoT-). L'espansione della Space Economy è guidata oggi prevalentemente da domanda commerciale, i servizi per le applicazioni militari sono però in fase di enorme espansione;
- La miniaturizzazione del carico utile (payload: sistemi di osservazione, antenne, sensori) e la corrispondente riduzione delle dimensioni medie delle piattaforme che ha comportato l'avvento di generazioni di mini, micro e nano satelliti; L'attenzione alle costellazioni di satelliti in orbita media 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 e Giappone).
- L'ingresso nel mercato dei servizi di lancio commerciali di nuovi attori in occidente e nei paesi asiatici.

Tutto ciò risulta in un mercato potenziale che vale ad oggi 337 miliardi di dollari.

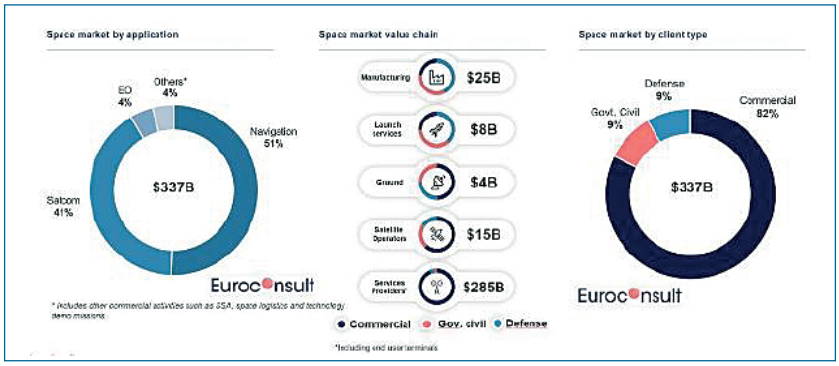


Figura 1: Il mercato spaziale a livello globale (Fonte: Euroconsult 2024).

Ciascuno dei fenomeni sopra elencati ha un impatto su diversi segmenti dell'industria spaziale, a cominciare dai sistemi propulsivi, sempre più un asset obbligato sulla maggioranza dei satelliti in orbita. Il capitolo svilupperà l'ambito della propulsione declinandola in vari segmenti tecnologici prioritari e strategici per l'Italia.

(A) PROPULSIONE ELETTRICA

Il ruolo dell'Italia negli sviluppi tecnologici della propulsione elettrica è stato centrale sin dagli albori, grazie soprattutto all'apporto carismatico del Professor Mariano Andrenucci, scomparso a marzo 2024. Il lavoro di Andrenucci, professore all'Università di Pisa dal 1977 al 2023 è testimoniato da centinaia di pubblicazioni scientifiche, da alcuni brevetti internazionali e dal suo contributo alla nascita di aziende come Alta Spa, da lui fondata e confluita in Sitael Spa nel 2014, e Aerospazio Tecnologie Srl. Nel 2011 il Professor Andrenucci ha ricevuto dall'Electric Rocket Propulsion Society la *Stuhlinger Medal*, il più alto riconoscimento del settore, con la seguente motivazione "per i suoi contributi teorici e sperimentali su vari concetti di propulsione elettrica e per il suo ruolo inestimabile nell'educare generazioni di ricercatori e leader nella propulsione elettrica". Questo capitolo è doverosamente dedicato alla memoria di Mariano Andrenucci e alla sua eredità scientifica.

Negli ultimi vent'anni 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) di un ordine di grandezza superiore rispetto ai propulsori chimici tradizionali, permettendo un significativo risparmio di propellente. L'entità della spinta è di contro direttamente proporzionale alla potenza elettrica immessa nel propulsore, e tipicamente è nel range delle decine o centinaia di milli-Newton, molto inferiore a quella di un tipico propulsore chimico.
La combinazione di bassa spinta ed alto impulso specifico caratterizza quindi i sistemi di propulsione elettrica, ed ha come conseguenza un utilizzo efficiente del propellente a bordo a scapito di tempi di missione più lunghi. In ultima analisi, un sistema di propulsione elettrica permette di svolgere una data missione con una frazione del propellente richiesto da un sistema di propulsione chimica, in tempi significativamente più lunghi.

Per la natura dei fenomeni fisici coinvolti, la propulsione elettrica è una tecnologia di propulsione che può essere utilizzata solo in orbita (*in-orbit propulsion)*, in condizioni di vuoto. Ciò implica che 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 centinaia di milligrammi per secondo, in modo da garantire una pressione operativa durante i test nell'intorno dei 10-5 mbar. Uno schema generale di un sistema di propulsione elettrica è mostrato in Figura 2.
I Propulsori Elettrici (*Thruster components* di Figura 2) sono sottosistemi composti da una parte anodica (il propulsore vero e proprio) e -nella maggioranza dei casi- uno o più catodi/neutralizzatori. L'assemblato è generalmente riferito come

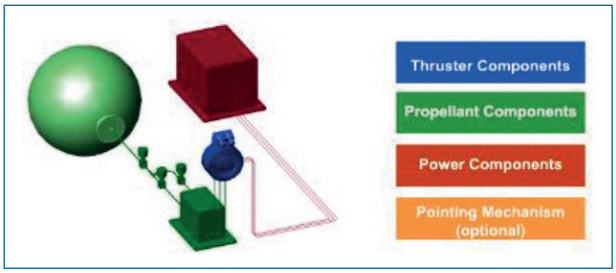


Figura 2: Sistema di Propulsione Elettrica: blocchi funzionali principali (Fonte: ESA).

"**propulsore**" o "**thruster unit**" (TU). I propulsori sono generalmente classificati in tre famiglie: **Elettrostatici, Elettromagnetici** e **Elettrotermici**. Sono i primi due a rivestire il maggiore interesse come sistema propulsivo primario a bordo di un satellite, in quanto a parità di potenza forniscono le prestazioni migliori in termini di impulso specifico, mentre i propulsori elettrotermici hanno una semplicità costruttiva e di funzionamento che indirizza il loro utilizzo verso manovre orbitali ausiliarie o piattaforme di classe cubesat.

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** (High Efficiency Multi-stage Plasma Thruster) e i **FEEP** (Field-Emission Electric Propulsion).

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), ma anche Iodio (I) in fase di vapore- che viene ionizzato (attraverso la collisione di elettroni emessi da un catodo, o con eccitazione dovuta a un generatore di radiofrequenze o di microonde). Gli ioni risultanti vengono poi accelerati da un campo elettrostatico.
Queste tipologie di propulsori sono anche dotate di un campo magnetico che esercita una funzione diversa a seconda della tecnologia: rallentamento 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. L'erosione affligge anche le **griglie** dei GIE, per i quali sono state studiate configurazioni complesse di camere di scarica e di sistemi di

griglie che permettono di avere una distribuzione di plasma uniforme e a potenziale sufficientemente basso da ridurre il fenomeno consentendo vite operative anche molto oltre le 20.000 ore.

I propulsori FEEP invece utilizzano un metallo liquido o leghe metalliche speciali come propellente (Cesio, Indio, Rubidio o leghe eutettiche Indio-Gallio), che viene ionizzato ed accelerato applicando una differenza di potenziale dell'ordine dei 10kV tra due elettrodi. Questo tipo di propulsione elettrica permette di ottenere impulsi specifici molto elevati, con spinte nel range dai micro-Newton ai pochi milli-Newton. Data la loro relativa semplicità e la peculiare caratteristica di non necessitare di serbatoi pressurizzati, i propulsori FEEP sono oggi molto utilizzati su cubesat e laddove la precisione e la modulabilità della spinta erogata è il parametro di riferimento.

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 dai 600 s fino ad oltre 10.000 s (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 e di massa di propellente.

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 piattaforme "**all-electric"** per manovre orbitali ausiliarie (come ad esempio de-orbiting e collision avoidance). In quest'ultimo caso, i propulsori elettrotermici sono alimentati con lo stesso propellente del sistema propulsivo principale, generalmente quindi Xenon.

Oltre al propulsore vero e proprio, 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** (di Figura 2) 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** (*Propellant components* di Figura 2) -che deve gestire il propellente stoccato nei tank ad alta pressione (in genere sopra i 150 bar, con punte sopra i 300 bar nel caso di propellenti come il Krypton), ridurre la pressione stessa a valori operativi (attorno ai 2 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 attuali 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** per rispondere alle crescenti esigenze di costellazioni di centinaia o migliaia di satelliti (OneWeb, LightSpeed, Starlink, Kuiper), vi è una crescente attenzione all'uso di **propellenti alternativi** allo Xenon, anche in questo caso in un'ottica di riduzione dei costi ricorrenti per il cliente finale, oltre alle **tecnologie volte ad incrementare la vita operativa** dei propulsori stessi, come il già menzionato magnetic shielding dei propulsori Hall per l'allungamento della loro vita operativa, o configurazioni non covenzionali delle griglie dei GIE. 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 (come i propulsori elettrotermici e i FEEP per cubesat) e -per HET e GIE- oltre i 20 kW per le piattaforme di trasporto spaziale e di esplorazione del Sistema Solare, i cosiddetti **Space Tug**.

(A) 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) e graveyarding (posizionamento del satellite in orbita di parcheggio a fine vita). La maggioranza 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 (LEO, low Earth orbit) possono beneficiare grandemente della propulsione elettrica: dovendo essi compensare gli effetti della resistenza aerodinamica atmosferica (drag), hanno bisogno di spinta costante e continua per mantenere l'orbita di missione. Il

caso del satellite GOCE è paradigmatico: la missione scientifica ad una quota tra i 250 e i 300 km è stata possibile solo grazie all'utilizzo di un sistema di propulsione elettrica tipo GIE.
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. Altri esempi di successo sono le missioni "sample return" Hayabusa 1 e 2 di JAXA e Dawn di NASA, con quest'ultima in grado grazie ai suoi propulsori GIE di sviluppare più di 11 km/s di delta-V.

Uno scenario nuovo è rappresentato dalle cosiddette **mega-costellazioni** di migliaia di piccoli satelliti in orbita LEO o MEO. Gli esempi conosciuti da tutti sono **Starlink** di SpaceX (che al momento conta di quasi 6.400 satelliti operativi in orbita LEO, e dovrebbe arrivare a 12.000 a dispiegamento completato) e **OneWeb** del consorzio Airbus-OneWeb, con più di 600 satelliti in LEO. 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 – 3000 W e scelta elettiva per sistemi basati su propulsori HET.

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) o multipli di essa sono oramai in commercio come elementi COTS "plug and play". Enpulsion (Austria) è l'azienda più attiva nel settore, ed ha recentemente salutato il duecentesimo sistema in orbita.

Questi due ultimi segmenti di mercato (ovvero, megacostellazioni e cubesat) 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 per le costellazioni, decine di migliaia di Euro per i cubesat).

L'utilizzo significativo della propulsione elettrica al posto di quella chimica tradizionale sta generando una competizione serrata tra i principali attori globali, sia nel campo delle piattaforme satellitari che, soprattutto, nel campo 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 "**all-electric**". La risposta europea è nelle piattaforme Electra di OHB e nel bus Neosat di Thales Alenia Space-Airbus. Anche questi satelliti utilizzano propulsori elettrici (di fabbricazione francese -Safran-) per tutte le manovre orbitali. 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 un cluster di propulsori Hall da 13,5 kW e da 6 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 dei piccoli satelliti e 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 3000 W e i tassi di produzione richiesti arrivano a quasi 100 sistemi completi

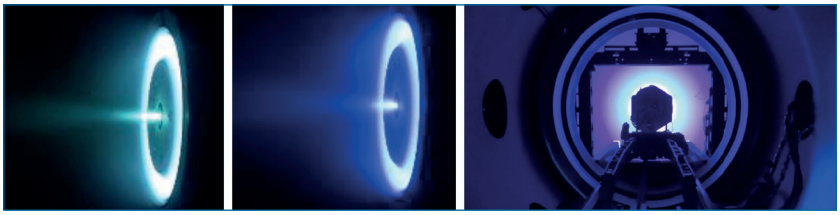


Figura 3: Il propulsore HT20k di SITAEL (20 kW di potenza, 1 N di spinta) in configurazione "magnetic shielding", operato con Xenon (a sinistra) e con Krypton (al centro) nella facility IV10. A destra una suggestiva ripresa del test dalla camera di servizio della facility IV10 (Fonte: SITAEL S.p.A)

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).

Altro elemento fondamentale per i sistemi propulsivi elettrici è il **propellente** utilizzato. Per il suo elevato peso atomico, la bassa energia di ionizzazione e la nulla reattività con i materiali, lo Xenon è da sempre il propellente di elezione per la propulsione elettrica. Di contro, questo gas nobile è estremamente raro nella nostra atmosfera, rappresentandone in media lo 0,0000087%. La produzione di Xenon è un sottoprodotto della distillazione dell'aria per ottenere ossigeno ed azoto, ma date le quantità presenti in atmosfera e le sfavorevoli caratteristiche chimico-fisiche, il processo è decisamente costoso, con prezzi al chilo che sono arrivati a 20.000 Euro e che dipendono molto dai cicli economici e dalle tensioni geopolitiche internazionali. Inoltre, questo gas è abbondantemente utilizzato in ambito medicale e per sistemi di illuminazione e la domanda spesso supera le quantità offerte dal mercato.
L'uso di propellenti alternativi allo Xenon diventa quindi un elemento strategico per la commercializzazione di questi sistemi. La scelta del propellente ha impatti diretti sulla linea fluidica, dal tank al riduttore di pressione, alla linea di distribuzione del flusso ad anodo e catodo.

Fra gli obiettivi sfidanti degli sviluppi in corso in tutto il mondo riguardanti l'apparato di gestione e controllo della potenza - la PPU - vi sono l'adozione di moduli funzionali standard, la minimizzazione delle modifiche per la gestione di diversi tipi di propulsori e di fluidiche, ed infine 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, minimizzando la complessità, il peso e i costi della PPU.

(A) STATO DELL'ARTE

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, capacità di analisi e modellazione dei fenomeni fisici, competenze sui propellenti alternativi.

È da rimarcare inoltre come il mutato scenario internazionale a valle dell'invasione dell'Ucraina da parte della Russia ha avuto un impatto assolutamente significativo sia sul mercato dei propulsori (i prodotti russi soprattutto di tipo HET -che hanno goduto di un vantaggio tecnologico enorme dovuto al loro impiego in orbita sin dagli anni 60 del secolo scorso, e che potevano contare su prezzi estremamente competitivi- non possono più essere montati su satelliti occidentali), sia su quello dei propellenti (il prezzo al litro di Xenon e Krypton, sottoprodotti

della distillazione dell'aria per produrre ossigeno nelle acciaierie, è decuplicato in pochi mesi per assestarsi adesso a prezzi comunque dalle 3 alle 5 volte superiori a quelli del 2020).
Il risultato netto è stato un fiorire di startup che mirano a sviluppare soprattutto propulsori HET, e il crescente indirizzarsi verso propellenti come il Krypton, l'Argon e lo Iodio, molto meno costosi dello Xenon.

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 e garantire i ratei di produzione e i prezzi che costellazioni e cubesat richiedono.

Per quanto riguarda la progettazione e produzione di propulsori HET in Italia, **SITAEL** copre un ampio ventaglio di applicazioni: **HT100** e **HT400** (potenza nominale 175 W e 700 W rispettivamente) per satelliti fino a 500 kg in orbite LEO, **HT5k** (potenza nominale 5 kW) per grandi satelliti MEO e GEO; **HT20k** (20 kW di potenza nominale) per piattaforme di trasporto spaziale. Il propulsore HT100 è attualmente operativo nell'ambito della missione congiunta ESA-ASI **microHETSat**, HT400 è in sviluppo su un contratto GSTP, HT5k è coinvolto in un programma di sviluppo di Horizon Europe mentre il propulsore HT20k è sviluppato con finanziamenti ASI e H2020.

Il **CIRA** di Capua ha attrezzato un laboratorio di propulsione elettrica, ove è ubicato il simulatore MSVC (Facility Medium Scale Vacuum Chamber). Concepita a supporto dell'industria nazionale, MSVC è operativa a partire dal 2021. Come primo test article, il CIRA sta sviluppando un mini-propulsore Hall di laboratorio con potenza nominale di 250 W (Figura 6). Il propulsore (la prima di tre unità realizzate) è in fase avanzata di caratterizzazione e ha già raggiunto un tempo di test cumulato superiore a 150 ore e ha un Isp di circa 1200 s. È in fase di ultimazione

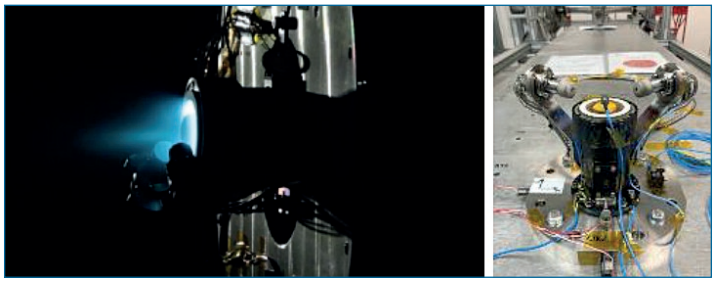


Figura 4: Il propulsore HT100 durante il firing test end-to-end del satellite microHETSat (a sinistra) e montato sullo shaker per i test di qualifica ambientale (a destra) (Fonte: SITAEL S.p.A)

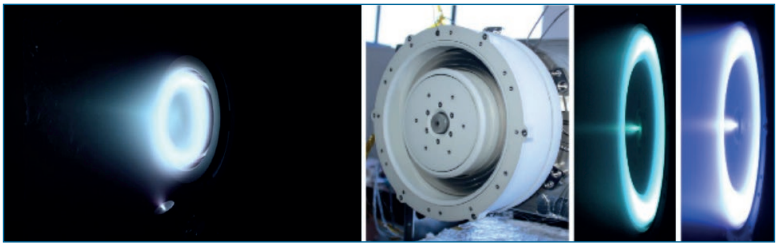


Figura 5: Il propulsore HT400 operato con Xe (a sinistra), il propulsore HT5k montato sulla bilancia di spinta (al centro) e mentre viene operato con Xe e Kr (a destra) (Fonte: SITAEL S.p.A)

un catodo cavo, denominato CR-CAT, specificamente progettato per l'accoppiamento con il suddetto propulsore.

Rimanendo nello stesso ambito si stanno inoltre sviluppando alcuni codici numerici per la modellazione del plasma all'interno dei catodi cavi e dei tool dedicati per il loro design ottimizzato. Il CIRA prevede inoltre di realizzare una nuova facility, denominata SSVC (Small Scale Vacuum Chamber), progettata in modo

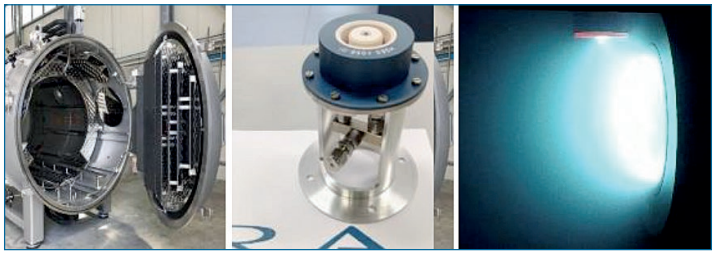


Figura 6: Facility MSVC (a sinistra); Motore CR-HET 250 e relativo firing test (a destra). (Fonte: CIRA)

specifico per il test dei prossimi catodi in via di progettazione e realizzazione.
Nell'ambito dell'attività di ricerca istituzionale dell'Agenzia Spaziale Europea e del programma H2020 dell'Unione Europea, **Aerospazio Tecnologie** e l'**Università di Pisa** stanno sviluppando un prototipo di propulsore HET di alta potenza (20 kW) a doppio canale (**TANDEM**) dotato di *magnetic shielding* e catodo centrale. L'obiettivo è quello di distribuire il flusso e quindi il carico termico così da minimizzare l'erosione rispetto ai modelli classici a singolo canale e permettere missioni ad alta spinta con una maggiore vita operativa. Il doppio canale consente inoltre una modularità di spinta che rende il propulsore flessibile ad operare su un ampio range di potenze, da 3-5 kW fino a 20-25 kW.



Figura 7: Il prototipo TANDEM da 20kW in preparazione per i test al banco. (Fonte: Aerospazio Tecnologie Srl).

Per quel che riguarda altre tecnologie, in Italia si sono sviluppati e sono in fase di sviluppo propulsori a radio-frequenza basati su antenne per il plasma (tipo Helicon) per i quali esistono prototipi a partire da 30 W fino a 1 kW 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 l'ambipolarità del flusso che permette di evitare neutralizzatori e semplifica quindi il design incrementandone l'affidabilità. Questa tecnologia consente inoltre la possibilità di impiegare diversi propellenti (Xenon, Kripton, CO2, Iodio etc.). Con particolare riferimento ai satelliti da 6 a centinaia di kg, T4i ha sviluppato la famiglia REGULUS, un'unità propulsiva

completa che combina un propulsore RF con Iodio allo stato solido come propellente. 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, rendendolo 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:

(i) Una architettura semplice, che consiste in una camera di scarica, un'antenna e un sistema di magneti.
(ii) Assenza di neutralizzatore e di griglie.
(iii) Propellente solido ad altissima densità (e facilità di utilizzo con altri propellenti).

La famiglia REGULUS è composta da varie taglie
REGULUS-50-I2 è il più piccolo sistema di propulsione elettrica della famiglia REGULUS ed è il primo prodotto T4i lanciato nel 2021. Sono disponibili tre versioni per affrontare diversi profili di missione: piccola, media e grande, rispettivamente con 3 kNs, 7 kNs e 11 kNs di impulso totale.
REGULUS-150-I2 è la versione scalata di REGULUS-50 con prestazioni migliorate per rispondere alle esigenze di mobilità nello spazio di micro e minor satelliti.

La sua modularità si traduce in due configurazioni: i) un unico sistema Plug&Play per semplificare l'integrazione, oppure ii) sottosistemi separati per ottimizzare l'efficienza volumetrica del satellite.
Uno studio molto avanzato è stato portato avanti nell'ambito dell'uso di propellenti green e di facile reperibilità, considerando anche i recenti problemi di approvvigionamento di Xenon e i costi ad esso associati.
Attualmente, l'uso dello Iodio presenta dei peculiari vantaggi:

- è solido in condizioni ambientali, quindi può essere stoccato in serbatoi non pressurizzati, garantendo un'efficienza volumetrica ottimizzata del sistema di stoccaggio.
- ha una densità molto elevata, per cui è possibile ottenere un impulso totale

più elevato a parità di volume di propellente, estendendo la capacità del propulsore.

• è abbondante nelle rocce della crosta terrestre (0,46 ppm) e 100 volte più economico dello Xenon.

• garantisce operazioni di manipolazione e stoccaggio più semplici, perché il satellite con l'unità propulsiva già riempita di Iodio può essere spedito alle strutture di prova e ai siti di lancio senza alcun problema di trasporto dovuto al monitoraggio della pressione o della temperatura.



Figura 8: REGULUS-50-I2 Propulsore al plasma ambipolare allo iodio

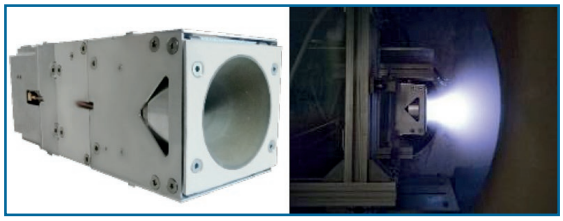


Figura 9: REGULUS-150-I2 di T4i versione 150W (sinistra) e test di REGULUS-150-I2 in camera a vuoto (destra)

Un nuovo segmento che negli ultimi anni sta riscuotendo un notevole interesse scientifico, commerciale e militare è quello dell'air-breathing o RAM-EP propulsion, ovvero sistemi propulsivi elettrici in grado di raccogliere ed utilizzare gli atomi di ossigeno ed azoto -ancora presenti ad altitudini tra i 160 ed i 250 km di quota, orbite chiamate VLEO, Very Low Earth Orbit - come propellente per un propulsore elettrico.

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. La tecnologia RAM-EP è stata sviluppata nell'ambito del progetto H2020 "AETHER", e brevettata a livello Europeo nel 2023.

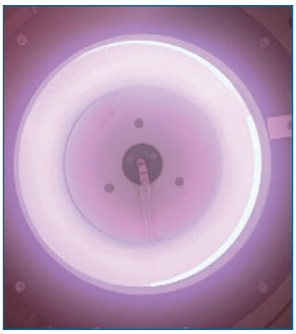


Figura 10: Il propulsore RAM-EP operato con una miscela O2-N2 che simula la composizione atmosferica a 200 km di quota. (Fonte: SITAEL).

Altri gruppi di ricerca afferenti alla Scuola Superiore Sant'Anna di Pisa stanno sviluppando concetti air-breathing differenti per piattaforme di classe cubesat.

Infine, il CIRA di Capua sta attualmente consolidando un modello numerico in grado di simulare la ionizzazione di gas diversi dallo Xenon, ed in particolare miscele di più gas reagenti come Ossigeno ed Azoto, proprio per far fronte alle future esigenze legate alla propulsione air-breathing.

Considerando la scala di potenze investigata negli ultimi decenni si prevede che la prossima classe di propulsori di interesse per il mercato sarà rappresentata dai modelli di alta potenza (20kW e oltre), segmento che vede l'Italia ben posizionata sia come tecnologie in fase di sviluppo, che per quel che riguarda le facilities per i test. In questo momento esistono in Europa 5 grandi impianti di prova in grado di ospitare test di propulsori di potenza superiore ai 10 kW, di questi quattro sono in Italia (uno in SITAEL a Pisa, 3 in Aerospazio Tecnologie a Siena) ed 1 in Germania (DLR-Gottingen). 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).

Questi impianti sono un asset nazionale importante, che va consolidato non solo

per gli sviluppi tecnologici futuri, ma anche e soprattutto per supportare le odierne capacità di prova e di produzione.
L'offerta italiana di impianti di test non ha eguali in Europa e può competere come prestazioni anche con gli impianti NASA. I laboratori di **Aerospazio Tecnologie** a Rapolano Terme (SI) e Collesalvetti (LI) ospitano 3 grandi impianti a vuoto, 4 medio grandi e 4 medio piccoli. L'azienda toscana serve clienti di tutto il mondo. Inoltre, Aerospazio Tecnologie possiede anche una delle poche facilities al mondo per i test in vuoto di compatibilità elettromagnetica (EMC) 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 anche di alta potenza in un ambiente molto simile al vuoto spaziale, simulando al contempo i cicli termici tipici di una missione reale.



Figura 11: I tre impianti di prova LVTF presso i laboratori Aerospazio Tecnologie a Rapolano Terme. (Fonte: Aerospazio Tecnologie Srl)

Tutte le iniziative di sviluppo inerenti la propulsione elettrica che si definiscono in ambito nazionale (ASI e Ministeri) si coordinano sinergicamente con i programmi ESA e con programmi di sviluppo Europeo in ambito Horizon Europe.

Dal 2023 anche l'EDA (European Defence Agency) è molto attiva nel promuovere progetti di ricerca industriale sulla propulsione elettrica, riconoscendo a questa tecnologia abilitante un notevole valore strategico.
È infine da ricordare la recente iniziativa Comunitaria IRIS2, che mira a sviluppare una costellazione multi-orbita interamente europea composta da centinaia di satelliti. Anche in questo scenario i sistemi propulsivi elettrici sono la scelta elettiva per tutte le piattaforme satellitari previste.

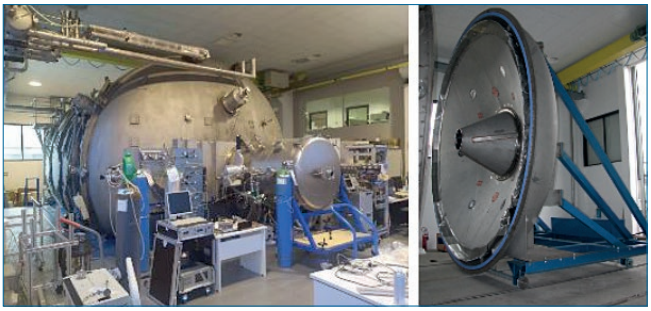


Figura 12: L'impianto di termovuoto IV10 nella sede SITAEL di Pisa. A sinistra: vista della parte posteriore con camera ausiliaria; a destra: il target di 6 metri di diametro posto sulla porta anteriore, aperta. (Fonte: SITAEL SpA)

Per quel che riguarda iniziative completamente nazionali in Italia la propulsione elettrica del tipo HET di classe 5 kW è la baseline per il programma Ital-GovSatCom, poi confluito nel satellite militare SICRAL 3. (

(A) 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, e di quanto la guerra in Ucraina abbia impattato sul settore, se la qualifica a terra di un propulsore di classe 5 kW aveva nel 2020 un costo di **solo propellente** di 1,5 milioni di Euro ogni 10.000 ore, il costo attuale si aggira sui 7,3 Milioni di Euro. Parallelamente se nel 2020 i costi di propellente per un propulsore da 20 kW arrivavano a 5,2 milioni di Euro ogni 10.000 ore, adesso lo stesso test costerebbe oltre 23 milioni di Euro.
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 15 milioni di Euro per un sistema di bassa potenza, a oltre i 40 milioni per sistemi da 20 kW. 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 con costi operativi elevati e personale dedicato a tempo pieno.

Riduzioni drastiche del costo di qualifica si otterrebbero utilizzando propellenti alternativi, come il Krypton (il cui costo al litro è un ordine di grandezza inferiore a quello dello Xenon) o l'Argon (ancor più competitivo), o 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, o infine sviluppando sistemi di qualifica misti, che si basano su test ridotti e su sistemi di modellazione basati su algoritmi di **machine learning** (ML) o I*ntelligenza artificiale* (AI).
Per quanto riguarda il primo aspetto un progetto Horizon Europe iniziato a gennaio 2024 con SITAEL capofila ("F4F") ha tra gli obiettivi proprio la definizione di un protocollo di qualifica meno costoso, in grado comunque di assicurare al cliente la rispondenza del propulsore ai requisiti di missione.
La IoV/IoD è uno strumento molto utilizzato anche da aziende italiane per sistemi di bassa potenza, come il **REGULUS** di T4i e **HT100** di SITAEL a bordo della già rammentata missione **microHETSat**.
Infine, un approccio di qualifica misto basato sia su prove in camera a vuoto, sia su algoritmi di ML è stato oggetto del progetto H2020 "ASPIRE", coordinato da SITAEL e conclusosi ad inizio 2024.

(B) PROPULSIONE AVANZATA

La Propulsione Green ha come obiettivo quello di trovare propellenti alternativi rispetto ai sistemi mono e bi-propellente basati sull'idrazina, al fine di ridurre l'impatto ambientale, i rischi connessi all'utilizzo (tossicità), la reattività (riaccensioni non programmate), il costo degli stessi propulsori e mantenendo nel contempo livelli di performance adeguati al 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.

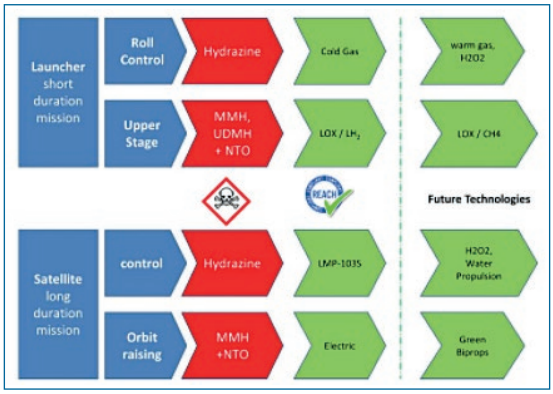


Figura 13: Aree tecnologiche di sviluppo Propulsione Green (Gotzig, Challenges and Economic Benefits of Green Propellants for Satellite Propulsion, EUCASS 2017).

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 entrambe 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 (H2O2, 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 (produzione, trasporto e caricamenti) di propellenti ad alto titolo e infine ai bassi impulsi specifici ottenibili. In alternativa ai sistemi

monopropellenti per il controllo di assetto, sono stati dimostrati recentemente sistemi bi-propellenti green 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 esempio 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.
Per i sistemi propulsivi orbitali "green" (ad esempio 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 1 sono elencate le tecnologie più promettenti, per sistemi propulsivi di spinta tra 1 kN e 20 kN, con impulso specifico superiore ai 300 s, che coprono le esigenze dei principali casi di uso in Europa, per piattaforme satellitari, upper stages di veicoli di lancio, e navette orbitali.
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

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

Tabella 1: Reagenti più promettenti in camera di combustione per spinte comprese tra 1KN e 20KN

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 (H2O2) 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 150 kN, passando per una prestazione intermedia quale 30 kN con un impulso totale > 106 Ns.
- Grani di paraffina associati alle prestazioni di cui sopra. La paraffina da una parte porta ad 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. 5 kg/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 (LOX/LCH4)**. 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. Da sottolineare come la tecnologia criogenica ossigeno/metano è quella utilizzata dai motori Raptor di **SpaceX** utilizzati nel sistema di lancio Starship-Falcon Super Heavy.
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 10 kN, possano avvicinarsi ai valori di un motore di volo, realizzando dapprima valori intermedi da 30 kN e poi i 100 kN previsti per un motore di stadio alto 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.

(B) 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 "*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 50 kg – 80 kg.
- 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 per la realizzazione missioni di osservazione della Terra sia per scopi civili (monitoraggio eventi catastrofici, confini) che militari (monitoraggio scenari bellici) e per missioni di telecomunicazione. 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, in quanto non sarebbe più necessario aspettare la disponibilità di un carico principale su un lanciatore di medio-grandi dimensioni, di cui essere il carico secondario. In genere, infatti, il lancio di piccoli satelliti è effettuato utilizzando lanciatori di grandi dimensioni, in concomitanza con il lancio di altri carichi utili.

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.
Quando si prendono in considerazione i **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 2000 kg e 700 km 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 700 km (orbita polare) con 1500 kg di carico pagante.
Diversi sono i programmi di sviluppo sul LOX/LCH4 (vedi sezione successiva), con SpaceX a guidare la fila e a proporre la tecnologia sul sistema Starship già menzionato.
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 per il volo un quarto stadio LOX/LCH4 consentirebbe l'acquisizione di un ulteriore stadio a tecnologia nazionale nel VEGA (il secondo e il terzo sono già prodotti da Avio).

(B) STATO DELL'ARTE

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.
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 (1 N) e uno da 22 Newton (22 N). Il lancio è avvenuto nel 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 ad 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).

In Italia sono in corso attività di ricerca mirate al miglioramento della tecnologia in termini di riduzione delle emissioni acide (i cosiddetti "clean propellants", propellenti puliti) e, in particolare AVIO sta studiando nuove famiglie di propellenti composti, in accordo con le tendenze e le linee guida emesse della comunità scientifica mondiale. Tra i progetti conclusi, AVIO ha partecipato a GRAIL (2014-2017, "Green Advanced High Energy Propellants For Launchers"), finanziato dalla Comunità Europea nell'ambito del programma Horizon 2020, a cui hanno partecipato diverse realtà industriali, centri di ricerca ed università europee.
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 ipergolicità con il propellente.

Data la sua relativa instabilità il perossido di idrogeno (H2O2) 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 concentrazione** (94%) con una spinta base di 50 N e la capacità di essere modulato con un rapporto di 1:5 e un impulso specifico in vuoto di 155 s.

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 sounding 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 nel 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 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 1,8 kN 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 104 Ns. 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/H2O2 a alta concentrazione (94%). Diversi modelli da laboratorio sono stati sviluppati e testati fino a 10 kN di spinta, con l'obiettivo di sviluppare un propulsore adatta a micro-lanciatori. Inoltre è in fase di sviluppo un modello ingegneristico da 500 N. 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 N2O 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).

Attualmente AVIO sta sviluppando, con fondi PNRR gestiti da ASI, l'evoluzione del già qualificato M10, un propulsore ad alta spinta alimentato a LOX-Metano che, grazie a un sistema competitivo, flessibile ed ecologico può fornire numerosi vantaggi, come ad esempio:

- la semplificazione architettonica attraverso l'uso di un'unica coppia di propellenti
- l'aumento complessivo delle prestazioni e della flessibilità grazie

alla possibilità di accelerare, spegnere e riaccendere i motori compreso il recupero e il riutilizzo
- l'aumento della cadenza produttiva con benefici sui costi ricorrenti
- la semplificazione della logistica e dei costi associati grazie alla possibilità di trasportare e immagazzinare stadi "a secco", in contrasto con l'uso di grandi motori a razzo a propellente solido.

Entro il 2026 sarà quindi realizzato un dimostratore M60, potenziato rispetto all'attuale M10, garantendo il raggiungimento di un livello TRL compreso tra 6 e 7, completamente compatibile con il completamento della qualifica e l'implementazione di un nuovo sistema di lancio utilizzando stadi LOX-Metano entro il 2030.

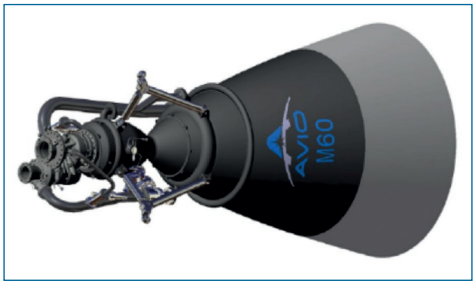


Figura 14: Layout del propulsore M60 (Fonte: AVIO)

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 LOX/LH2 e LOX/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 ha sviluppato e validato in volo i propulsori riutilizzabili **RAPTOR** basati

su un ciclo staged a LOX/LCH4; questi motori erano inizialmente concepiti come utilizzo negli upper stage, ma sono stati efficacemente utilizzati per il primo e secondo stadio del sistema Starship, e ipotizzati come sistema propulsivo per il velivolo di trasporto interplanetario che è in sviluppo sempre in Space X. I RAPTOR sviluppano una potenza di 3 MN.

La **NASA** ha sviluppato un motore da 20 kN *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 LOX per produrre una spinta di 2400 kN. 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 LOX/LNG per il terzo stadio.

In sviluppo dal 2002 una camera di spinta con camera di combustione ablativa da 100 kN (LE-8). Al momento ha accumulato 2200 secondi di test e un impulso specifico di 315 s.

Un'altra camera da 30 kN ablativa è stata testata in un impianto con il simulatore di altitudine, dimostrando un impulso specifico di 335 s. Visti i risultati non brillanti in termini di impulso specifico è stato sviluppato un motore da 100 kN basato sul ciclo "gas generator" raffreddato in modo rigenerativo. Questo motore è stato testato a terra per 27 volte accumulando 1800 secondi di vita utile e un impulso specifico stimato di 356 s 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 1000 kN di spinta che porterà tre grosse innovazioni: una forte riduzione dei costi di fabbricazione, riutilizzabilità e nuovi propellenti (LOX/LCH4).
AIRBUS sta sviluppando un motore basato sul ciclo "gas generator" da 420 kN, **ACE-42R,** riutilizzabile 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.

In **Italia** nel programma HYPROB (affidato al CIRA) si stanno sviluppando le tecnologie abilitanti per la propulsione LOX/LCH4 attraverso il design, il manufacturing ed il test di alcuni *breadboard* (prototipi) disegnati per lo studio delle fenomenologie di base della propulsione LOX/LCH4, così come previsto da finanziamento **MUR**.
Nel programma **ASI-JAXA** l'Italia (rappresentata dal CIRA ed AVIO) e il Giappone hanno cooperato mettendo a fattor comune le capacità nel campo della R&S legate alla propulsione LOx/LCH_4,, realizzando e testando nel 2020 una **TCA (thrust chamber assembly) LOx/LCH_4, da 10 ton**.
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 LOx/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.

(B) RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

Da quanto emerso nei paragrafi precedenti, emergono 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 essere anche 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*.

E' 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 50 M€.

(C) e (D) PROPULSIONE RAMJET/SCRAMJET

I propulsori "air-breathing" per alte velocità, Ramjet e Scramjet, sono classificati come esoreattori in quanto sfruttano l'ossigeno dell'aria come ossidante nella reazione di combustione, e sono caratterizzati da una semplicità costruttiva, vista l'assenza di turbo-macchine (compressori, fan, turbine), associata ad una elevata efficienza propulsiva nel range di numeri di Mach che va da 2.5 a 6÷10, comprendendo i Ramjet, in cui la combustione avviene in regime subsonico, e gli Scramjet, in cui la combustione avviene in regime supersonico (Figura 15).

Tra gli svantaggi di tali sistemi propulsivi, in cui il flusso viene compresso e riscaldato dalla presa d'aria opportunamente conformata, occorre evidenziare gli elevati carichi termici per la camera di combustione e l'ugello propulsivo, ed i sistemi meccanici di attuazione di parti mobili (per presa d'aria ed ugello), necessari per adattarsi alle differenti condizioni di volo. Altri componenti importanti e critici di tali motori sono il sistema di alimentazione del combustibile con relative linee fluidiche e serbatoi, il sistema di stabilizzazione della fiamma (flame-holding), l'eventuale sistema di ausilio per l'accensione, ed il sistema di raffreddamento.

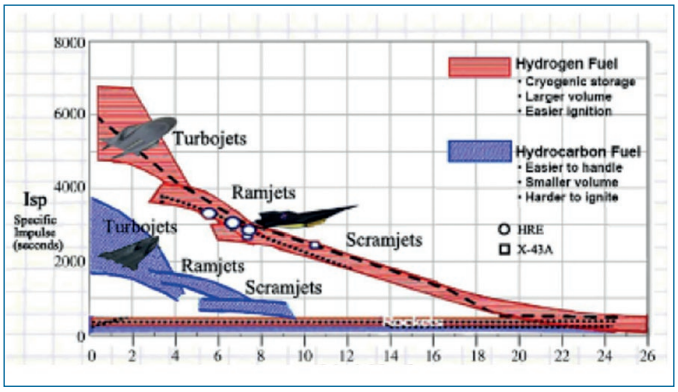


Figura 15: Impulso specifico in funzione del numero di Mach per vari tipi di propulsori aerospaziali (Fonte: https://www.quora.com/What-is-the-ramming-effect-in-jet-engines)

L'uso di tali propulsori 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 da tale tipo di sistema di propulsione abbiamo:

1. Riduzione dei tempi di volo su rotte transoceaniche per applicazioni civili
2. Aumento del raggio di azione e riduzione del "time-to-target" per applicazioni militari
3. Riduzione del peso del sistema propulsivo rispetto al peso totale per i lanciatori
4. Possibilità di sistemi di recupero con velocità supersoniche/ipersoniche

(C) Propulsione RamJet

I propulsori Ramjet, rappresentati in Fig 15.3-2, sono i propulsori "airbreathing" più semplici ed 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.

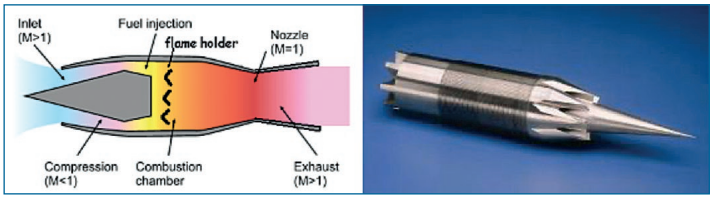


Figura 16: Schema di Schema di funzionamento di un Ramjet (a sinistra) e modello di propulsore (a destra) (Fonte: https://www.quora.com/What-is-the-ramming-effect-in-jet-engines)

Tra i possibili utilizzi di un velivolo equipaggiato con sistema propulsivo Ramjet (vedere il Lockheed D-21 degli anni 60-70 riportato in Figura 17), 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

Nell'ambito di un'attività di interesse industriale relativa a progettazione, realizzazione e test in volo di un dimostratore di un UAV propulso (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.



Figura 17: High-altitude (27km) high-speed (Mach≥3.3) reconnaissance drone Lockheed D-21 dotato di sistema propulsivo Ramjet
(Fonte: https://www.militaryfactory.com/aircraft/detail.asp?aircraft_id=1150)

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 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, vedere esempi riportati in Figura 18.
- 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 *Technology Readiness Review* che si raggiungerebbe con tale sperimentazione a terra è TRL=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*).

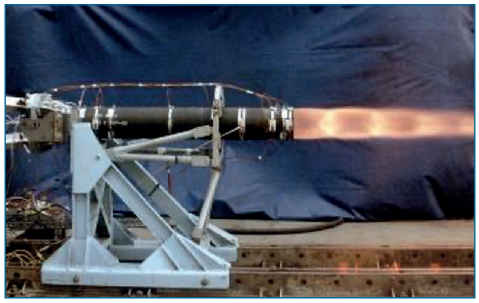


Figura 18: Tipico test al banco
(Fonte: https://www.mbda-systems.com/press-releases/mbda-herakles-safran-group-and-roxel-optimise-the-ramjet-sector/)

CIRA ha preliminarmente definito un impianto di prova per la propulsione Ramjet, individuandone le caratteristiche e prestazioni principali riportate nella Tabella 2. 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 stabilizzatori 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

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

Tablella 2: Caratteristiche e prestazioni principali della propulsione Ramjet

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.

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 ➔ TRL=7 ("*System prototype demonstration in a space environment*")

Passi questi ultimi che richiedono necessariamente una forte sinergia dal punto di vista tecnologico, realizzativo, organizzativo e logistico con partner industriali e istituzionali (come ad esempio l'Aeronautica Militare Italiana).

(C) MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Negli ultimi tempi AVIO, MBDA ed Aeronautica Militare Italiana hanno manifestato interesse nello sviluppo di capacità nazionali nell'ambito della propulsione Ramjet, finalizzate all'utilizzo per missioni in ambito duale e per veicoli suborbitali. I motori Ramjet non hanno ancora una piena maturità tecnologia per essere ampiamente utilizzati per il volo, motivo per il quale lo sviluppo di capacità di test nazionali per tali propulsori potrebbe essere, quindi, un importante asset per il paese.
In particolare, per lo sviluppo dei propulsori Ramjet un primo e fondamentale passo è ovviamente costituito dalla ***sperimentazione a terra, con associato sviluppo di metodologie per la progettazione ed analisi***.

L'impianto proposto da 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/CH4) e ibridi (N2O/Wax), oltre alle capacità di progettazione ed analisi maturate da CIRA nell'ambito della partecipazione a progetti europei (LAPCAT-I/II, HEXAFLY, STRATOFLY) e nazionali (HYTAM) dedicati alla propulsione airbreathing.
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.

(C) STATO DELL'ARTE

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.

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.

(C) 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:

- 4.5 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.
- 5 anni per avere l'impianto funzionante con matrice test di accettazione eseguita.

(D) PROPULSIONE SCRAMJET

La volontà e la necessità di costruire un mezzo di trasporto aereo in grado di raggiungere velocità ipersoniche sono sempre più marcate in campo aerospaziale. Dal lato aeronautico, infatti, è sempre più pressante il desiderio di poter raggiungere due punti antipodali della terra in 2÷4 ore al massimo. La Commissione Europea nell'ambito dei programmi FP6, FP7 e Horizon 2020 ha cofinanziato negli ultimi anni vari progetti (LAPCAT 2005-2008, LAPCAT-II 2008-2013, HEXAFLY 2013-2014, HEXAFLY-INT 2014-2019, STRATOFLY 2018-2022) dedicati agli sviluppi tecnologici per velivoli ipersonici, avendo individuato come target un sistema di trasporto in grado di eseguire una crociera a quote stratosferiche (25÷35 km) ad una velocità compresa nel range Mach 4÷8 (Figura 19).

Considerando l'impegnativa missione di un velivolo ipersonico, il sottosistema propulsivo rappresenta sicuramente uno dei punti critici, soprattutto per la necessità di una progettazione altamente integrata tra il sistema propulsivo stesso e

la configurazione esterna, al fine di avere una elevata efficienza globale del velivolo (efficienza aerodinamica, ottimizzazione della spinta e dei consumi, riduzione delle emissioni, sia chimiche che acustiche, in tutte le fasi del volo). Altra criticità è rappresentata dalla scelta, lo stoccaggio e la distribuzione del propellente che, nel caso dell'idrogeno (scelto nel filone di sviluppo della EC e molto indicato per velivoli ipersonici perché ad elevato contenuto energetico), può porre dei requisiti molto stringenti per le infrastrutture aeroportuali. Il basso livello di maturità di molte delle tecnologie collegate alla propulsione è da decenni uno dei principali deterrenti allo sviluppo di un velivolo ipersonico.

Lo schema di funzionamento di un propulsore Scramjet è rappresentato in dettaglio in Figura 20, dove è chiaro come l'integrazione della configurazione aerodinamica del veicolo risulti fondamentale: la parte anteriore dello stesso è parte integrante della presa d'aria che genera la compressione e il riscaldamento del flusso che entra nel condotto motore, dove viene iniettato il combustibile che brucia in condizioni di velocità supersonica (Mach 2÷3), mentre la parte posteriore è parte integrante dell'ugello propulsivo e partecipa alla generazione della spinta. Considerando poi che il tempo di permanenza in camera di combustione a una tale velocità supersonica è dell'ordine dei millisecondi, il problema



Figura 19: Velivolo ipersonico MR2.4 del progetto LAPCAT-II
(Fonte: https://www.researchgate.net/figure/LAPCAT-MR2-Hypersonic-Aircraft-4_fig1_274633140)

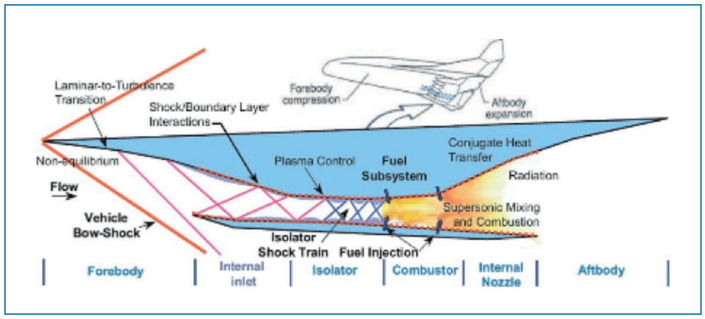


Figura 20: Schema di funzionamento di un sistema propulsivo scramjet (Fonte: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-scramjet-engine-structure_fig1_335164588)

è progettare in maniera efficiente le fasi di iniezione, miscelazione, accensione della miscela aria/combustibile e rilascio di calore prima che il combustibile possa fuoriuscire non bruciato dall'ugello.

Come per i propulsori Ramjet, anche i motori Scramjet hanno lo svantaggio del funzionamento a punto fisso e la conseguente necessità di un propulsore aggiuntivo per il raggiungimento della velocità di crociera. I sistemi di propulsione Dual-Mode Ramjet (DMR) in parte riducono questa problematica, potendo la combustione avvenire nella stessa camera di combustione sia in modalità Ramjet che Scramjet. Ovviamente, non c'è ancora una piena maturità tecnologica per essere utilizzati per il volo.
Il primo passo per l'evoluzione della tecnologia della Propulsione Scramjet passa per la disponibilità di un impianto di prova a terra per la simulazione sperimentale di tali sistemi propulsivi, e più in generale di una intera configurazione aero-propulsiva di un velivolo scramjet.
Lo sviluppo di capacità di test di propulsori DMR presso il CIRA potrebbe essere, quindi, un importante asset per il paese. L'impianto di prova ed i relativi dimostratori porrebbero infatti le basi per le attività di ricerca, mentre le campagne sperimentali fornirebbero indicazioni e dati importanti per la comunità scientifica nazionale.

Non c'è ancora un impianto simile in Italia a supporto dell'industria nazionale. L'impianto di prova immaginato permetterebbe una simulazione sperimentale completa in condizioni di volo (o molto vicine al volo) del funzionamento di un propulsore DMR dotato di presa d'aria ed ugello a geometria variabile, oltre che essere a tutti gli effetti una galleria aerodinamica in regime ipersonico "freddo".

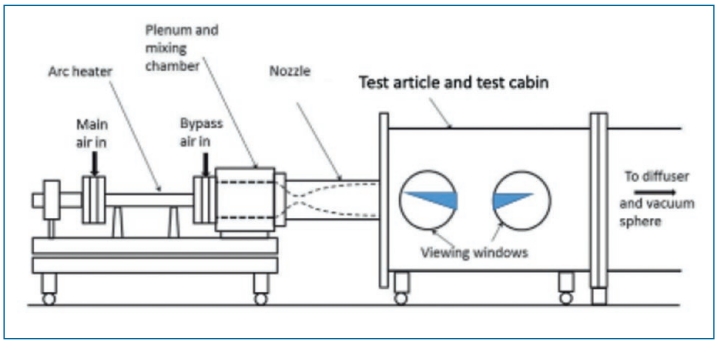


Figura 21: Schema preliminare di una galleria ipersonica per prove di motori DMR (Fonte: CIRA)

Il nuovo impianto ideato dal CIRA, il cui schema preliminare è rappresentato in Figura 21 e che sfrutterebbe il già presente sistema di aria compressa centralizzato, sarebbe adatto per prove sperimentali di dimostratori completi di sistemi propulsivi DMR (Figura 22), dalla presa d'aria, all'isolatore, alla camera di combustione e fino all'ugello propulsivo, riproducendo in termini di numero di Mach e di Reynolds delle condizioni molto vicine a quelle reali di volo.
Un tale impianto di prova permetterebbe di provare i sistemi propulsivi DMR da differenti punti di vista:

- effetto dei numeri di Mach e Reynolds sulle prestazioni di un DMR
- transizione da modalità ramjet (Mach=4÷4.5) a modalità scramjet (fino Mach=10)
- effetto della geometria variabile della presa d'aria su efficienza e spillamento
- studio delle prestazioni di un DMR (spinta, impulso specifico, efficienza di combustione, ritardo all'accensione, stabilità di fiamma, emissioni)
- studio dell'effetto dell'ER, del tipo di combustibile, del livello di aria viziata

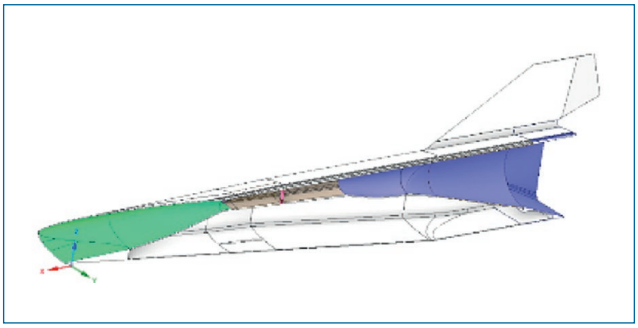


Figura 22: Condotto propulsivo del velivolo ipersonico SHEV (Fonte: CIRA)

Ovviamente, al fine di sfruttare al meglio le performance dell'impianto, i dimostratori dovrebbero essere complessi, con presa d'aria e ugello a geometria variabile per adattarsi alle diverse condizioni di volo simulate (quindi con i relativi sistemi di attuazione e controllo), mentre è assolutamente necessaria e critica la presenza di un sistema di trattamento dei gas di scarico, che raggiungerebbero alte temperature nel diffusore a valle (raffreddamento, filtri e materiali adatti per le pompe). Sono stati definiti per tale impianto di prova dei requisiti per le prestazioni principali (Tabella 3):

Una volta poi raggiunto con le prove in un tale impianto un livello TRL=6 (System/subsystem model or prototype demonstration in a relevant environement (ground or space) dalla classificazione NASA) per la tecnologia della Propulsione Scramjet, il possibile successivo sviluppo per incrementare il livello di TRL nazionale sarebbe ovviamente la progettazione, realizzazione e test in volo di un dimostratore ipersonico dotato di un propulsore DMR per elevare il livello della tecnologia Scramjet a TRL=7 (System prototype demonstration in a space environment come da classificazione NASA).

tempo di prova	30 s
portata d'aria	8 kg/s
Portata H_2	0.3 kg/s
Portata O_2	1.4 kg/s
$P_{combustore}$ (ramjet/scramjet)	10bar/2bar
$T_{combustore}$	2400 K
Sezione camera di prova	2m x 2m
Lunghezza modello (max)	1.9m
Larghezza modello (max)	0.23m
Numero di Mach	4÷10
Numero di Reynolds	$3 \div 30 \cdot 10^6$

Tabella 3: Requisiti per le prestazioni principali dell'impianto di prova

(D) MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

La disponibilità e l'utilizzo di un tale impianto di prova sarebbe molto utile per la prosecuzione, a valle della progettazione preliminare (dopo il 2025) del progetto Space-Ipersonica-TEC finanziato dal PRO.R.A. DM662, e cofinanziato per un triennio dall'Agenza Spaziale Italiana tramite apposito accordo, dedicato a testare in volo le tecnologie abilitanti per i velivoli ipersonici futuri, tra le quali ovviamente il sistema propulsivo scramjet, i materiali, il sistema di guida e controllo.

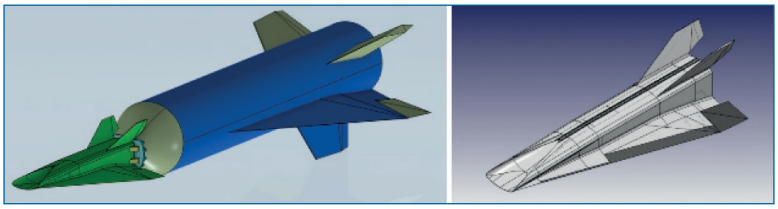


Figura 23: Sistema di lancio (a sinistra) e dimostratore SHEV (a destra) del progetto Space-Ipersonica-TEC DM662

Nella Figura 23 è rappresentato il dimostratore *Scramjet Hypersonic Experimental Vehicle* (SHEV) accoppiato ad un veicolo di lancio (LV) nell'ipotesi che tutto il payload venga rilasciato da un aereo-madre a velocità subsonica e quota di 13÷15 km.
La realizzazione del dimostratore e della relativa missione sperimentale a velocità ipersonica e quote stratosferiche eleverebbe a TRL=7 ("*System prototype demonstration in a space environment*" da classificazione NASA) la tecnologia della Propulsione Scramjet.
Inoltre, facendo riferimento al forte carattere duale dei velivoli ipersonici, si ricorda il forte interesse in ambito volo ipersonico e relative tecnologie sia dell'Amministrazione Difesa nazionale che dell'EDF della Commissione Europea.
Lo sviluppo di capacità di test di propulsori Dual-Mode Ramjet (DMR) presso il CIRA può essere un importante asset per il paese, dove si potrebbero approfondire le problematiche connesse a questa tecnologia, fornendo al contempo alla comunità nazionale un impianto di riferimento per eventuali studi per lo sviluppo di propulsori di interesse industriale. Inoltre, la presenza di un impianto di questo tipo potrebbe consolidare il ruolo strategico del CIRA in programmi europei di sviluppo relativi ai velivoli ipersonici.

È ovvio che un tale investimento richiede, in fase di fattibilità, un dettagliato approfondimento sui possibili ritorni strategici attesi che garantiscano nel futuro l'utilizzo, la funzionalità e la manutenzione dell'impianto stesso. E' inoltre neces-

saria una forte sinergia dal punto di vista tecnologico, realizzativo, organizzativo e logistico con partner industriali e istituzionali (Aeronautica Militare Italiana).

(D) STATO DELL'ARTE

La Comunità Europea negli ultimi quindici anni ha lanciato progetti dedicati allo sviluppo di sistemi propulsivi Dual-Mode Ramjet (DMR), che equipaggiano velivoli da trasporto civile ad elevata velocità (Mach da 5 ad 8) capaci di volare su rotte transoceaniche in poche ore. In particolare, nell'ambito dei progetti EC LAPCAT-II ed HEXAFLY-INT, ed in quello Franco/Russo LEA, sono stati utilizzati, dopo ricondizionamenti tecnici più o meno onerosi, i seguenti impianti di prova che in alcuni casi in origine erano gallerie del vento ipersoniche:

- **Germania:** DLR-HEG a Göttingen (Germania) per sistema scramjet a Mach 7.4 e Reynolds di volo e tempo di prova dei 100 ms
- **Russia:** C16VK al Central Institute of Aviation Motors (CIAM) di Mosca (Russia) per sistema scramjet a Mach tra 6 e 7.5, e tempo di prova dei 30s
- **Francia:** ricondizionamento della galleria S4Ma di ONERA a Modane (Francia) con un riscaldatore per test in modalità Free Jet tra Mach 6.5 e 8

Infine, negli **USA** la NASA è dotata del 8-foot High Temperature Tunnel a Langley (Virginia) per la qualifica in condizioni simili al volo stratosferico iperveloce di sistemi propulsivi, strutture e sistemi di protezione termica per velivoli ipersonici. Non c'è ancora un impianto simile in Italia a supporto dell'industria e della comunità scientifica nazionale.

(D) RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

Sono state fatte le seguenti stime di risorse economiche e tempi necessari per raggiungere il target di TRL 6 in Italia per quanto riguarda la tecnologia della Propulsione Scramjet:

- 22 milioni di euro per progettazione e realizzazione dell'impianto per propulsione per i test di motori DMR, 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.

• 6 anni per avere l'impianto funzionante con matrice test di accettazione eseguita.

(E) PROPULSIONE AD ACQUA

L'esigenza sempre maggiore di utilizzare propellenti "green", economici, facilmente reperibili, ad alte prestazioni e che permettano sistemi e procedure semplificate, sta portando, negli ultimi anni, allo sviluppo di sistemi propulsivi alimentati ad acqua. Infatti, quest'ultima è praticamente gratuita, azzera i rischi per gli operatori, semplifica l'architettura del sistema propulsivo, affrancandolo da componenti specifici quali latch valve, e il relativo trasporto, anche verso nazioni extra-EU.
In aggiunta, l'acqua è l'unico modo per trasportare idrogeno-ossigeno ad alta densità e con serbatoi leggeri, avendo quindi alta spinta ed alto impulso specifico in un sistema compatto e leggero.

Il trend degli ultimi anni è quello di spedire in orbita costellazioni di decine/centinaia satelliti, portando l'industria spaziale alla stregua di un classico fornitore di servizi, tendendo ad una produzione in serie economicamente vantaggiosa.
Lo stato dell'arte della propulsione spaziale è fondamentalmente elettrica. Questa è caratterizzata da impulsi specifici estremamente elevati ma da complicazioni di sistema, di approvvigionamento del propellente, e procedurali altrettanto elevati. Inoltre, la propulsione elettrica è caratterizzata da spinte estremamente basse (mN o μN) che comportano tempi molto lunghi per la realizzazione di manovre quali, ad es., cambi d'orbita, limitando la profittabilità del satellite. Ciò porta alla necessità di installare sistemi di propulsione ausiliaria che spesso utilizzano propellenti a base di idrazina, estremamente tossica, complicando tutta l'architettura del satellite.
La propulsione ad acqua è potenzialmente in grado di superare i limiti della propulsione elettrica e della propulsione chimica, soprattutto quella basata su propellenti ad alto grado di tossicità.
La propulsione ad elettrolisi di acqua

Tra i concetti propulsivi che utilizzano come propellente acqua, quello ad elettrolisi è sicuramente quello con le maggiori potenzialità tecnologiche. In diverse pubblicazioni è categorizzato come "propulsione semielettrica", proprio a suggerire quel ruolo di ponte tra la propulsione elettrica e quella chimica.
In particolare, l'acqua, immagazzinata in serbatoi a bassa pressione, e dal semplificato controllo termico, viene elettrolizzata per produrre, direttamente in orbita, idrogeno e ossigeno in rapporto stechiometrico. A seconda della tecnologia propulsiva, ossigeno ed idrogeno sono poi immessi in camera per generare la spinta necessaria attraverso la relativa combustione in motori a razzo, oppure stoccati in serbatoi per poi essere indirizzati ad anodo (l'ossigeno) e catodo (l'idrogeno) di propulsori elettrici.

Nei motori a razzo, o endoreattori, il processo di ricombinazione di ossigeno ed idrogeno permette di avere spinte ed impulsi specifici elevati (Figura 24).
Il sistema di propulsione è costituito principalmente dai seguenti componenti:

- Un serbatoio per l'immagazzinamento dell'acqua a bassa pressione, quindi leggero e con un elevato rapporto massa immagazzinata per unità di volume del serbatoio. La quantità di acqua determina l'impulso totale che il sottosistema di propulsione può generare;
- Un elettrolizzatore che decompone l'acqua in H_2 ed O_2, anche ad alta pressione. La potenza elettrica, disponibile per il processo di elettrolisi, determina la velocità di produzione dei gas e quindi il profilo di sparo (continuo o discontinuo con stoccaggio intermedio dei gas prodotti). Il design dell'elettrolizzatore (numero di stack, volume, peso, pressione dei gas, etc.) è strettamente funzione delle condizioni al contorno ed operative del satellite e quindi del propulsore. L'elettrolizzatore, all'occorrenza, può funzionare anche in maniera inversa per la generazione di energia elettrica per il satellite ed il suo payload.
- Una camera che genera spinta tramite la combustione dei gas generati nell'elettrolizzatore.

Nei propulsori elettrici l'uso di ossigeno ed idrogeno comporta la necessità di

separare i due gas a valle del processo di elettrolisi, e alimentare l'elemento più sensibile della thruster unit (ossia il catodo) con il solo idrogeno, nel caso in cui il catodo stesso sia basato su tecnologie di emissione termoioniche, a causa della elevata sensibilità dell'elemento emettitore alla contaminazione da ossigeno.

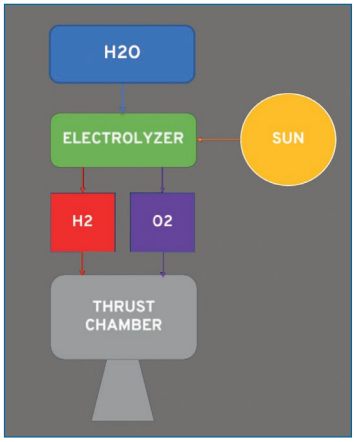


Figura 24: Schema di funzionamento di un propulsore ad elettrolisi di acqua (Fonte: MIPRONS)

(E) MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO E STATO DELL'ARTE

Lo scorso 22 marzo 2022, l'ESA ha dichiarato che la propulsione ad elettrolisi dell'acqua "*è uno dei sistemi di propulsione innovativi più avanzati e presenta una moltitudine di vantaggi rispetto ai sistemi di propulsione attuali*", (da "ESA R+D days: Propulsion, Aerothermodynamics and Flight Vehicles Engineering Division"). Infatti, ESA ha definito il 2028 come data per un dimostratore europeo.

La motivazione di tale dichiarazione può risiedere nel fatto che l'acqua ha le potenzialità per divenire il volano per una nuova rivoluzione spaziale; infatti, offre vantaggi di tipo tecnico, gestionale/economico e geopolitico.
Inoltre, è l'unico propellente che può realmente accelerare l'esplorazione umana, sfruttando appieno l'economia lunare, e la futura economia marziana, attraverso il diretto approvvigionamento su pianeta (ISRU, *In Situ Resource Utilization*).
Da ciò si intuisce che le applicazioni sono le più svariate: da sistema propulsivo per satelliti, o loro carrier, a in-orbit servicing, kick-stage, etc.
Per quanto disponibile da fonti aperte, si può affermare che attualmente nel mondo ci sono alcune società che stanno sviluppando propulsione ad elettrolisi acqua, tre in Europa, di cui una in Italia, e un paio negli Stati Uniti.

MIPRONS

MIPRONS è una startup innovativa italiana fondata nel 2019, con sede operativa a Colleferro (Roma). La specificità del sistema propulsivo MIPRONS risiede nella versatilità e nell'elevato rapporto performance/peso/volume. Infatti, in circa 0,6 l e 1,4 kg, di volume e peso, può generare spinte fino ad oltre 3 N, con impulsi specifici superiori ai 320 s; tutto ciò con efficienza di elettrolisi superiore all'80%, per potenze in ingresso fino a 120 W.

Ciò lo rende ideale sia per satelliti nano che di grandi dimensioni.

MIPRONS, protetto da 5 brevetti internazionali, sull'architettura di sistema e sui singoli componenti, è stato progettato per affrancarsi dalle richieste autorizzative sull'esportazione dei beni a duplice uso per permettere tempi di consegna estremamente ridotti. Il sistema ad elettrolisi di MIPRONS è oggi a TRL5, si prevede il TRL7 entro Q3-Q4/2025.



Figura 25: Il sistema MIPRONS (Fonte: MIPRONS)

(AVS)/URA Thrusters

AVS sta sviluppando, inter alia, propulsione ad elettrolisi di acqua dal 2017; il livello di sviluppo e pari a TRL5.

AVS è una grande azienda con un ampio focus tecnologico nel mercato spaziale, con sedi permanenti in diversi paesi in Europa e negli Stati Uniti. Le filiali dell'UE sono stabilite nel Regno Unito e in Spagna. La società madre è stata fondata nel 1997 e genera ricavi di decine di milioni solo negli Stati Uniti. Nel dicembre 2019 AVS ha scorporato una società nel Regno Unito, URA Thrusters, per commercializzare propulsori che utilizzano acqua per la propulsione spaziale. URA Thrusters sviluppa diversi tipi di propulsori alimentati ad acqua. Tra questi ICE (Figura 26), che si basa su elettrolisi e combustione catalitica. L'azienda rivendica diverse configurazioni di **ICE**, tutte nell'intervallo dei mN. La convalida in volo dell'ICE dovrebbe avvenire nel 2025.

L'azienda inglese ha in catalogo anche un propulsore HET ad acqua (Wet-HET) in due taglie di potenza, 2 e 5 kW, con prestazioni inferiori (circa un terzo) rispetto ai tradizionali propulsori HET a Xenon-Krypton ma con il vantaggio del costo irrisorio del propellente. Il propulsore è in sviluppo in collaborazione con l'Imperial College of London, e URA conta di qualificarlo entro il 2026.

ArianeGroup

ArianeGroup è uno dei maggiori attori nel mercato della propulsione spaziale. Sviluppa e fornisce soluzioni innovative e competitive per lanciatori spaziali civili e militari, con esperienza in tutti gli aspetti delle tecnologie di propulsione all'avanguardia. ArianeGroup è capofila dei veicoli di lancio Ariane 5 e Ariane 6 dell'ESA, responsabile sia della progettazione che dell'intera catena di produzione, fino alla commercializzazione da parte della controllata Arianespace, nonché dei missili della forza di deterrenza oceanica francese. Ha una reputazione globale come specialista nel campo delle apparecchiature e della propulsione per applicazioni spaziali

ArianeGroup sta lavorando dal 2016 a un sistema di propulsione ad elettrolisi di acqua per grandi veicoli spaziali in sostituzione dei sistemi ad idrazina. Tuttavia,

dichiara che il sistema è attualmente troppo complesso per essere utilizzato in sostituzione dei tradizionali sistemi a propulsione chimica.
Il loro piano attuale è quello di lanciare una demo tecnologica entro il 2025.

Tethers Unlimited Inc (TUI)

La società, fondata nel 1994, ha sede negli Stati Uniti ed è un attore affermato nel mercato della tecnologia spaziale. Produce una moltitudine di prodotti per l'industria spaziale, tra cui il propulsore **HYDROS**. HYDROS è un propulsore ad elettrolisi di acqua attualmente disponibile in due configurazioni: HYDROS-C e HYDROS-M. Entrambi indicati a TRL6, si differenziano per la taglia di satellite su cui vengono installati e per l'impulso totale, rispettivamente circa 2150 Ns e 18000 Ns. HYDROS-C, la versione per cubesats, è stato selezionato per volare col Technology Demonstrator (PTD).



Figura 26: Il sistema HYDROS-C (Fonte: Tethers Unlimited Inc.)

RocketStar Inc

A marzo la società americana RocketStar ha annunciato che il suo propulsore **FireStar M1.5** sarà testato in orbita in due voli del carrier ION di D-Orbit del 2024. Il propulsore, di tipo PPT, ha un volume di una unità cubesat (10 cm3), usa acqua sotto forma di vapore come propellente che viene ionizzato e successivamente esposto ad atomi di Boro che darebbero origine ad un processo di fusione aneutronica. Il propulsore -a detta dell'azienda USA- garantirebbe prestazioni eccezionali in termini di spinta (17,2 mN) e impulso specifico (7.300 s) con soli 18 W di potenza, prestazioni ovviamente da verificare in orbita.

(E) RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

Come annunciato durante lo scorso 22 marzo 2022, in occasione degli "ESA R+D days: Propulsion, Aerothermodynamics and Flight Vehicles Engineering Division",

ESA prevedeva un budget di circa 8M€ per giungere ad un livello di sviluppo pari a TRL8, attraverso la dimostrazione in volo del sistema propulsivo, in una specifica missione Cube/Small-Sat, così da caratterizzarne le prestazioni nelle reali condizioni operative.

Le attività previste sono:

- Sviluppo dei componenti hardware;
- Sviluppo dei software di controllo e avionica;
- Qualifica dei componenti (i.e. serbatoi per acqua e per i gas prodotti; elettrolizzatore; camera di spinta; etc.);
- Qualifica del sistema propulsivo integrato;
- Volo dimostrativo.

NUOVI PROPELLENTI SOLIDI

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 sottocomponente 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.

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

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 allo stesso tempo 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 prestazioni 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.

Lo sviluppo di nuove classi di propellenti solidi per motori spaziali è principalmente mirato al controllo dell'impatto ambientale, in termini di riduzione di emissioni di sostanze inquinanti, che devono però assicurare, allo stesso tempo, prestazioni propulsive e caratteristiche meccaniche equivalenti a quelle di un propellente solido tradizionale, basato sul polimero HTPB.
Per quanto riguarda il controllo dell'impatto ambientale, sono in fase di sviluppo propellenti solidi che, durante le fasi operative del motore, producono gas di combustione caratterizzati dalla quasi assenza di specie tossiche e corrosive. Ad esempio, sono oggetto di sviluppo propellenti che promettono una riduzione fino all'80% delle emissioni acide attraverso l'uso di nitrato di ammonio (AN), nitrato di sodio (NaNO3), ossidanti ad alta energia (es. ADN, FOX-7, RDX), polveri di magnesio (Mg) e nanopolveri di alluminio (Al). L'ottimizzazione delle prestazioni propulsive, per compensarne le perdite legate all'uso ridotto di composti con Cloro, si ottiene mediante leganti energetici (GAP e POLYNIMMO) e "Bonding Agent" avanzati (Ossazoline, derivati ossazolinici, isocianurati trisostituiti THEIC, ecc.).

STATO DELL'ARTE

Negli Stati Uniti, in Cina, in Russia ed in alcuni stati Europei (Francia, Svezia) le attività di ricerca e sviluppo sono rivolte verso 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 composti da materiali energetici, in accordo con le tendenze e le linee guida emesse 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") e GRAIL (2014-2017, "Green Advanced High Energy Propellants For Launchers"), entrambi finanziati dalla Comunità Europea nell'ambito del programma Horizon 2020, cui hanno partecipato diverse realtà industriali, centri di ricerca ed università europee.

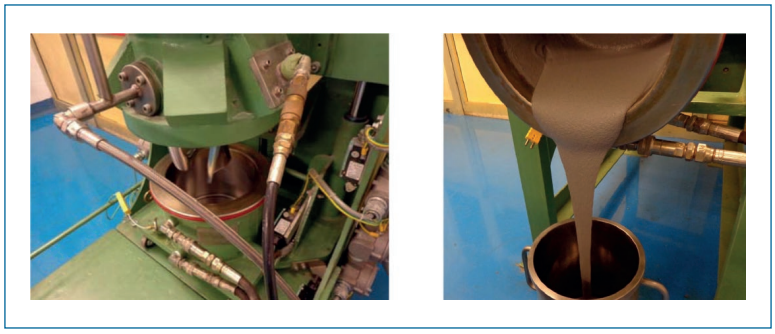


Figura1: Prima fase di produzione Propellente (Fonte: Avio)

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

L'orizzonte di sviluppo e produzione dei propellenti verdi avanzati richiede investimenti significativi (fino a centinaia di milioni di euro) non solo per le attività di ricerca finalizzate allo studio e alla selezione delle molecole adatte, ma, soprattutto, per l'industrializzazione dei processi di sintesi (considerando che si tratta di materiali energetici), di flemmatizzazione e di logistica.

SERBATOI E STRUTTURE DI NUOVA GENERAZIONE PER LANCIATORI E VEICOLI SPAZIALI

Negli ultimi anni le realizzazioni di serbatoi di grandi dimensioni per applicazione nei veicoli di lancio di nuova generazione si è orientata verso l'utilizzo dei materiali compositi senza liner, anche per applicazioni criogeniche. Tuttavia, le tecnologie di realizzazione dei serbatoi in composito forniscono risultati equivalenti a quella tradizionalmente 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 in composito con liner interno in materiale polimerico (di tipo V), 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 1: Phoebus (Fonte: Esa)



Figura 2: Vus (Fonte: Avio)

Studi tecnologici e trade-off propulsivi identificano per la taglia di Vega Upper Stage (lo stadio LOx-LNG del futuro Vega E) vantaggi significativi in termini economici e di prestazioni 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 pressu

rizzate 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 così 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.
Un esempio di componente in composito sviluppato e realizzato da Avio per applicazioni aeronautiche (in ambito finanziamenti regionali) è quello di un prototipo di Oil Tank di un motore turbofan, cioè un serbatoio per olio operante ad alta temperatura (circa 200°C) e con un'architettura che richiede punti di contatto con le regioni calde del motore.

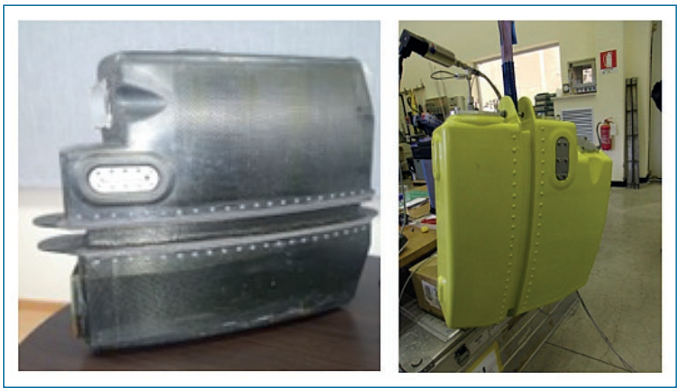


Figura 3: Oil Tank in composito per motore areonautico (Fonte: Avio)

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 degli interstadi mediante tecnologie automatizzabili (tipo "anisogrid deposition"). La concezione dei componenti sfrutterà l'uso di tecnologie trasversali come il cosiddetto "Health Monitoring".

(A) 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 bulk head 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 cilindrica esterna di sostegno.

(A) MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Il miglioramento della frazione in massa degli stadi a propellenti liquidi criogenici, richiede un utizzo 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 competi-



Figura 4: Robotic Afp (Fonte: Boeing R&T)

tive 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.

(A) STATO DELL'ARTE

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 Italia, in ambito finanziamenti PNRR, Avio sta sviluppando un Cryo Tank in composito per LOx-LNG che farà parte del sistema propulsivo del terzo stadio di Vega-E (Figura 5).



Figura 5: Cryo Tank in composito – prova di test a pressione con azoto liquido (fonte: Avio)

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.

(B) 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 liqui-

di) 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 in 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;
- cale-up del processo.

(B) 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).

(B) STATO DELL'ARTE

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.

(C) 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 che consente, 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 ricorrenti del prodotto. 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 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) che su nuove tecniche di saldatura quali il FSW (Friction Stir Welding), abbinate alla serializzazione dei processi per gli elementi strutturali tipici che li compongono.

(C) 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 così 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 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 con diametri tra i 4 e 6m e lunghezze comprese tra i 10 ed i 15m) ed 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 per 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.

Per potenziare le capacità di saldatura in termini di gamma di spessori e configurazioni di giunto e 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);
- perimentazione su leghe di alluminio innovative ad elevate prestazioni e



Figura 6: Impianto di saldatura fsw (Fonte: Thales Alenia Space in Italia)

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. (

C) STATO DELL'ARTE

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.
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.



Figura 7: Modulo Cygnus saldato con tecnica fsw (fonte: Thales Alenia Space in Italia)

(D) 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 definisce 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;
- ealizzazione prova su prototipi in scala 1:1 in ambiente rilevante.

(D) 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.

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...



Figura 8: McDonnell Douglas Dc-Xa with composite LH2 Tank (Fonte: Boeing)

Gli impatti a bassa velocità che possono essere indotti durante le fasi di produzione, integrazione, movimentazione (danni accidentali) ed 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.

(D) STATO DELL'ARTE

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.

(E) STRUTTURE AD ALTA STABILITA' DIMENSIONALE DI TIPO ANISOGRID

Nell'ambito delle soluzioni per strutture ad alta stabilita dimensionale, come ad esempio gli interstadi e gli adattatori per il supporto del payload di lanciatori, un posto centrale è ricoperto dalle strutture innovative cosiddette "anisogrid" (ovvero anisotropic-grid). Esse rappresentano un concetto più generale e struttural-

mente 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.

(E) 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 amplificano le deformazioni locali in accoppiamento con i carichi generali del lanciatore (carichi di natura
aerodinamica).

(E) STATO DELL'ARTE

Le strutture realizzate con tecnologia anisogrid sonostate utilizzate per la prima volte sui lanciatori sovietici, in seguito allo sviluppo di Vasiliev. In Italia, è stato realizzato con tecnologia anisogrid l'interstadio 2-3 del lanciatore Vega-C, sviluppato in collaborazione con il CIRA e qualificato con il maiden flight di Vega-C a luglio 2022 (Figura 9).

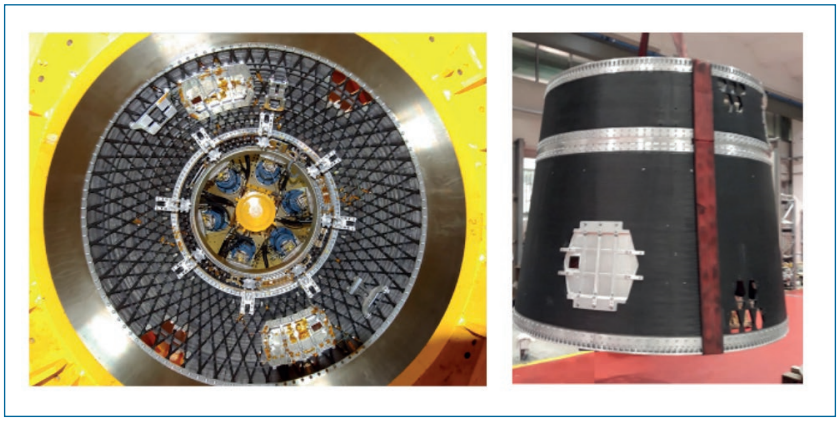


Figura 9: Interstadio 2-3 Di Vega-C realizzato in composito con Tecnologia Aisogrid (Fonte: Avio)

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

Le risorse economiche necessarie per gli ambiti di sviluppo presentati vengono stimate con i seguenti ordini di grandezza:

(A) > 50 M€ per i grandi serbatoi a bassa pressione e strutture di connessione in composito linerless
(B) > 30 M€ per i piccoli serbatoi in composito per gas ad alta pressione
(C) > 20 M€ per le tecnologie di saldatura per componenti in pressione
(D) > 20 M€ per le tecnologie di controllo olistico e di health-monitoring
(E) > 30 M€ per le strutture ad alta stabilità dimensionale di tipo anisogrid

In conclusione, si prevede la necessità di un investimento complessivo non inferiore a 150 M€.

TRASPORTO SPAZIALE

TECNOLOGIE PER L'ACCESSO ALLO SPAZIO

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 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 bi-stadio (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 microsistemi rendono possibili missioni speciali non coperte dalle rotte battute commercialmente, o per le quali lo schieramento veloce è un fattore critico.

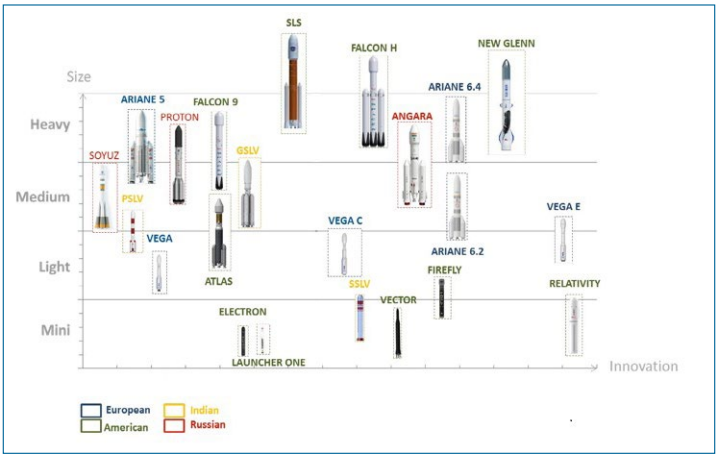


Figura1: Accesso allo Spazio: gli attori principali (Fonte: Avio)

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 minisatelliti 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 quelli 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.).

In questo scenario affrontiamo quindi un portafoglio di diverse tecnologie, di seguito descritte: a) Tecnologie per veicoli di lancio parzialmente riutilizzabili; b) tecnologie per piccoli veicoli di lancio; c) Tecnologie per l'estensione dei servizi ai carichi utili; d) Tecnologie per il lancio da piattaforma mobile; e) Tecnologie per la sicurezza e la telemetria.

IL PERCORSO DI SVILUPPO DEI SISTEMI DI LANCIO DELLA FAMIGLIA VEGA

In Figura 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 sia alla riduzione del costo specifico di lancio (a 12.000$/kg di carico utile in LEO per questa classe di satelliti) sia all'estensione della versatilità e dei servizi al carico utile.

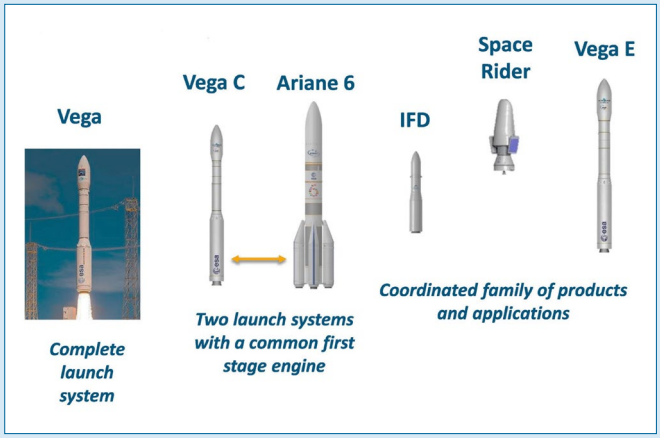


Figura 2: L'evoluzione dei Piccoli Lanciatori Europei (Fonte: Avio)

(A) 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 (GNC), 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 prima di tutto l'ottimizzazione dell'architettura di veicoli riutilizzabili. Ad esempio, per massimizzare gli indici di riuso (in termini di convenienza economica), l'architettura del lanciatore dovrebbe avere una grande parte della distribuzione del valore sul primo stadio, con configurazioni multistadio. Inoltre, in funzione del modello economico europeo, la strategia di rientro e atterraggio 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.

Oltre allo studio dell'architettura ottimale, le fasi di sviluppo del veicolo riutilizzabile devono prevedere:

- l'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 durante le fasi di volo con accelerazione negativa;
- estensione dei requisiti di durata operativa per i componenti a vita limitata (camere di combustione, turbomacchine, scudi termici, tenute criogeniche, ecc.);
- strategie di manutenzione, riparazione, collaudo ed "health monitoring";
- tecnologie del Sistema di Terra (ad es. monitoraggio e sicurezza del volo nella fase di rientro).

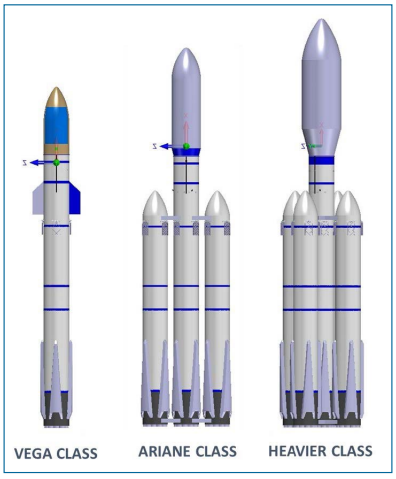


Figura 3: Primo stadio riutilizzabile (Fonte: Avio)

(B) 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.

(C) 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 riaccendibile: 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;



Figura 4: Adattatori e dispenser versatili per carichi utili (Fonte: 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;
- moduli propulsivi addizionali per missioni che richiedano lunghe manovre di trasferimento orbitale, a base di propulsione elettrica o chimica.
- moduli di rientro riutilizzabili per operazioni di download di carichi utili dall'or-

bita bassa a pista aeroportuale.

(D) Tecnologie per il lancio da piattaforma mobile

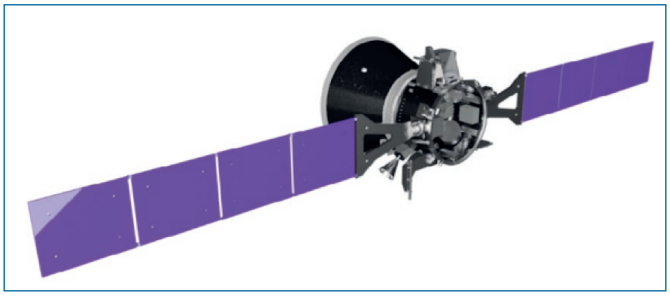


Figura 5: Modulo estensione della vita orbitale (Fonte: Avio)

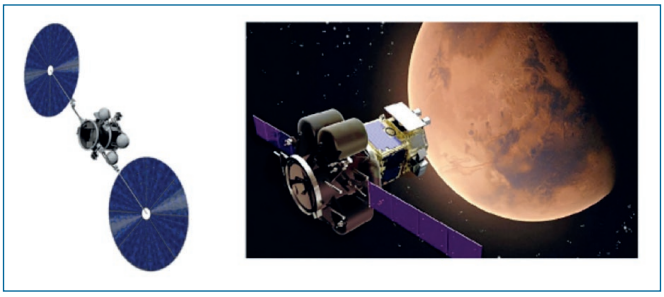


Figura 6: Moduli propulsivi ausiliari (Fonte: Avio)



Figura 7: Space Rider (Fonte: Avio)

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 Aero-portata, il veicolo di lancio è un lontano derivato delle versioni da piattaforma fissa e ha una configurazione ritagliata attorno all'aeromobile vettore.

(E) 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

I ricavi globali nel settore della Space Economy sono più che raddoppiati negli ultimi 15 anni, passando dai 176 miliardi di dollari del 2005 ai 469 miliardi del 2021; si prevede una crescita di circa il 7% all'anno fino al 2026.
Nell'anno fiscale 2021, gli Stati Uniti si posizionano al primo posto per investimenti nel settore, con una spesa di 43,01 miliardi di dollari. L'Europa si posiziona al secondo posto, con investimenti per 11,48 miliardi di dollari, seguita da Cina, Russia, Giappone e India.
L'attuale Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) prevede il finanziamento diretto allo Spazio per 1,49 miliardi di euro. Anche se ingenti, le risorse stanziate copriranno solo una quota degli investimenti per alcune linee di intervento: SatCom, Osservazione della Terra, Space factory, Accesso allo Spazio, In-orbit economy e Downstream.

(A) TECNOLOGIE PER VEICOLI DI LANCIO PARZIALMENTE RIUTILIZZABILI

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 per lo sviluppo dei lanciatori che entreranno in servizio a partire dal 2030, cioè quando la dimensione attesa del mercato renderà l'architettura parzialmente riutilizzabile certamente vantaggiosa anche in ambito europeo.

(B) TECNOLOGIE PER PICCOLI VEICOLI DI LANCIO

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.

(C) TECNOLOGIE PER L'ESTENSIONE DEI SERVIZI AI CARICHI UTILI

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.

(D) TECNOLOGIE PER IL LANCIO DA PIATTAFORMA MOBILE

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, 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 ope

razioni 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 aeroortato 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 SeaLaunch, consorzio russo, norvegese e statunitense 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.

(E) TECNOLOGIE PER LA SICUREZZA E LA TELEMETRIA

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, è 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

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 al settore, lo stato dell'arte è in veloce trasformazione per quanto riguarda:

- I 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, bi-stadio da 35ton di carico utile in LEO è previsto per il 2024. 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 a partire dal 2030. Un elemento del lanciatore cinese Lunga Marcia è in trasformazione per dimostrazione della configurazione VToVL (Vertical Take-off Vertical Landing). 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).

• I 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 (con il Miura-5, primo lancio nel 2026 dalla Guyana francese), Orbex (con Orbex Prime, primo lancio a fine 2024 dallo Sutherland Spaceport), OHB Rocket Factory (con RFA One, primo lancio entro il 2024). In Italia il progetto di riferimento è l'IFD (sviluppato in ambito PNRR da Avio), basato su elementi e tecnologie di derivazione Vega, il cui primo volo è previsto entro il 2025.

• 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).

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

Le risorse economiche necessarie per gli ambiti di sviluppo presentati vengono stimate con i seguenti ordini di grandezza:

- > 100 M€ per le tecnologie per veicoli di lancio parzialmente riutilizzabili
- > 50 M€ per le tecnologie per piccoli veicoli di lancio
- > 100 M€ per le tecnologie per l'estensione dei servizi ai carichi utili
- > 50 M€ per le tecnologie per il lancio da piattaforma mobile
- > 20 M€ per le tecnologie per la sicurezza e la telemetria

In conclusione, si prevede la necessità di un investimento complessivo non inferiore a 320 M€.

TECNOLOGIE PER IL RIENTRO ATMOSFERICO

Nell'ambito dei sistemi di trasporto spaziale giocano un ruolo fondamentale alcune tecnologie e discipline, identificate come "abilitanti", quali

- Aerodinamica e l'Aerotermodinamica
- Guida, Navigazione e Controllo
- Sistemi di Protezione Termica.

Le prime forniscono 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 altri pianeti. La seconda rappresenta il vero "cervello" del sistema rendendone possibile la missione attraverso la sensoristica ad esso asservita che fornisce l'input ai sistemi di controllo (superfici aerodinamiche, thrust vectoring, reaction control system). Infine, i sistemi di protezione termica garantiscono il mantenimento di condizioni idonee alla sopravvivenza del sistema stesso, isolandolo dalle severe condizioni esterne dovute all'attraversamento ad altissima velocità (>7km/s) dell'atmosfera.

Lo scenario tecnologico qui proposto riporta una sintesi degli aspetti principali delle prime due tecnologie, funzionale all'approfondimento proposto in relazione ai sistemi di protezione termica.

DESCRIZIONE DELLE TECNOLOGIE

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 sia 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 verificare in piccola scala materiali per i sistemi di protezione termica sia in atmosfera terrestre sia 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.

È necessario inoltre 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 Thermal Protection System (TPS) da diversi attori internazionali (ESA, NASA, ISRO, JAXA, Sierra Nevada Corporation, Ariane Group) 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 e 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 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.

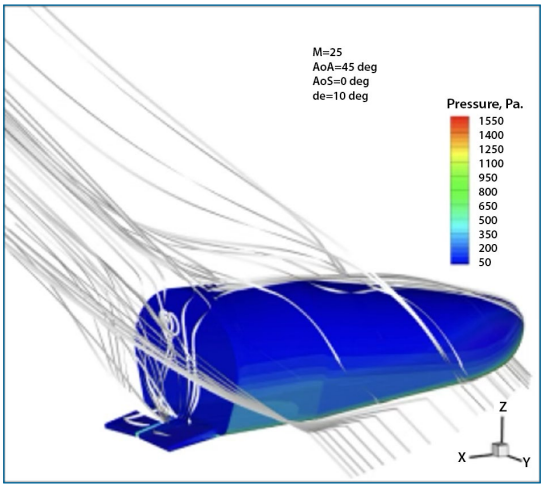


Figura 1 : IXV Simulazioni CFD (Fonte: ESA)

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 2 è riportato 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).

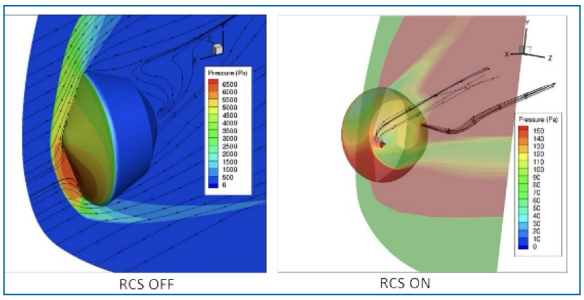


Figura 2 :Simulazione CFD degli effetti dei propulsori per il controllo di assetto sul campo aerodinamico di una capsula (Fonte: TASinI / CIRA).

A complemento del panorama dei codici CFD applicati e finalizzati 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 multidisciplinare.

Sistemi di Guida, Navigazione e Controllo

Dal punto di vista dei sistemi di GNC (Guida, Navigazione e Controllo), il volo dei due velivoli Castore e Polluce nell'ambito del programma aerospaziale nazionale PRORA USV-1 ha permesso al CIRA di evidenziare la sua notevole capacità in questo settore. In particolare, gli algoritmi implementati hanno consentito il controllo della missione dallo sgancio da pallone, avvenuto a circa 30 km, 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 con gli sviluppi tecnologici nell'ambito del programma aerospaziale nazionale PRORA e, grazie alla partecipazione al programma Hexafly-INT finanziato dalla Commissione Europea e dall'ESA, 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 maturata 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 poi permesso la partecipazione al progetto ESA Space Rider che, dal punto di vista del GNC, sta vedendo 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 termo-strutture

Uno degli aspetti tecnologici più critici connesso al rientro atmosferico è senza dubbio la disponibilità di materiali in grado di resistere agli elevati carichi termici tipici del volo ipersonico e la loro ingegnerizzazione al fine di progettare e realizzare i sistemi di protezione termica e le termo-strutture dei diversi sistemi di trasporto spaziale.

In funzione del tipo di missione e della configurazione aerodinamica del veicolo (capsula, lifting or winged body, …) i requisiti del sistema di protezione termica possono differire notevolmente e dunque le tecnologie applicabili possono essere molto diverse.

La riutilizzabilità e la manutenibilità è un altro requisito che recentemente è diventato essenziale guardando alla riduzione dei costi di accesso allo spazio ed alla sostenibilità del trasporto spaziale in generale. Tale aspetto può essere considerato soltanto con le energie relative al rientro da orbite LEO.

Una tecnologia che ben si presta a tale tipologia di missione è basata sui compositi a matrice ceramica (CMC), ed in particolare:

- compositi C/C (fibre di carbonio, matrice carbonio) che trovano un'applicazione strategica per l'industria aerospaziale italiana come costituente degli inserti di gola di ugelli per propulsori a propellente solido di elevate prestazioni (tale tecnologia è stata utilizzato già per il Nose ed i bordi d'attacco alari dello Space Shuttle con un rivestimento superficiale antiossidante di Carburo di Silicio);

- compositi C/SiC (fibre in carbonio, matrice carburo di silicio) per sistemi di protezioni termiche per veicoli spaziali;
- compositi SiC/SiC (fibre e matrice in Carburo di Silicio). Il cui sviluppo è stato spinto per le palette di turbina ed altri componenti dei motori per l'aviazione civile ma non ancora usati in campo spaziale.

Il sistema di protezione termico del veicolo sperimentale dell'ESA IXV utilizzava il C/SiC sia per il sistema di protezione termico che per le superfici di controllo. Tali componenti venivano realizzati da industrie francesi e tedesche. (Herakles, ora ArianeGroupe e MT-Aerospace).

Nel 2016 nasce la collaborazione tra il CIRA e PETROCERAMICS Spa, azienda italiana che operava all'epoca quasi esclusivamente nel settore automotive e partecipata del gruppo industriale Brembo.
Forti dell'esperienza sulla ricerca sui materiali avanzati e su sistemi di protezioni termiche nonché sulle tecnologie di manifattura di materiali compositi a fibra lunga per applicazioni aeronautiche di CIRA e del notevole know-how sulle tecniche di infiltrazione da silicio liquido del settore automobilistico di alta gamma di PETROCERAMICS è stato sviluppato un composito ceramico rinforzato, denominato ISiComp®, 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. a 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. a deposizione di un coating superficiale per la protezione delle fibre dai fenomeni ossidativi particolarmente critici durante la fase di rientro in atmosfera.

Nel 2018, la maturità tecnologica è stata dimostrata mediante una prova in SCIROCCO (Figura 3) 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.
Successivamente è stata verificata anche la riutilizzabilità dell'ISiComp® (Figura 4) sottoponendo dei coupon a sei cicli di esposizione al plasma, corrispondenti all'inviluppo di missioni previsto per l'intera vita operativa del veicolo Space Rider a due livelli di flusso termico. Per ognuno dei cicli il materiale è stato sottoposto ad un flusso ipersonico ad alta entalpia grado di generare una temperatura superficiale di 1.250 °C e oltre 1450° nella seconda campagna di prova 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.



Figura 3 :Dimostratore Tecnologico ISiComp nella camera di prova di SCIROCCO (Fonte: CIRA)

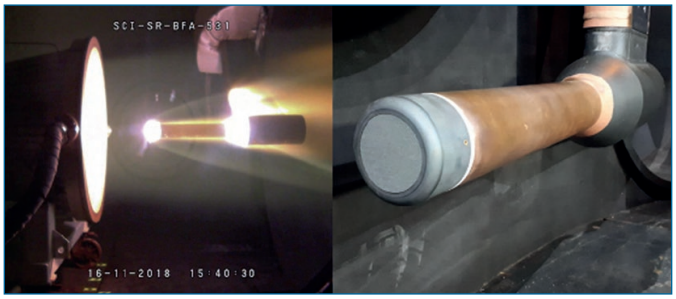


Figura 4: Campione di ISiComp esposto al flusso ipersonico nella galleria SCIROCCO (Fonte: CIRA)

Sviluppata inizialmente nell'ambito del Progetto PRO.RA. SHS, la tecnologia è stata accettata da ESA e oggi viene applicata all'intero Sistema di Protezione Termica Ceramico ed alle superfici di controllo del veicolo di rientro riutilizzabile Space Rider. In Figura 5 è riportato l'intero sistema di protezione termico ceramico di Space Rider.

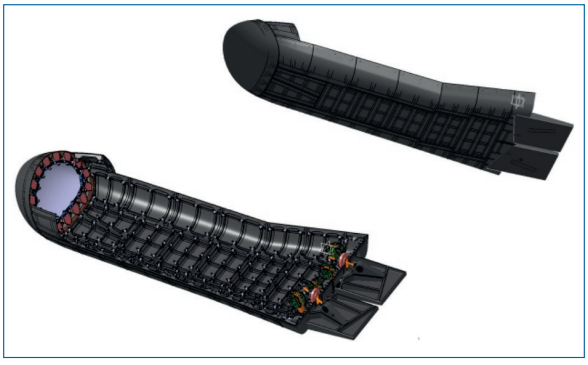


Figura 5: TPS Ceramico e Body Flap Assembly di Space Rider (Fonte: CIRA / Thales Alenia Space in Italia)

Il Nose è il più grande componente monolitico di C/SiC prodotto per LSI mai realizzato. Il Windward è composto da 21 Shingles (5 piane e 16 curve) e due componenti denominati Hinge TPS all'interno dei quali vengono alloggiate le superfici di controllo. Tutti i componenti eccetto i Body Flap sono composto dalla

parte CMC, da una selezione di materiali isolanti opportunamente dimensionati e dagli elementi metallici di interfaccia con la struttura fredda. Il design è stato derivato da quello di IXV ma ottimizzato e adattato alla tecnologia manifatturiera dell'ISiComp®

Per il Body Flap è stato applicato un approccio al design ibrido che prevede il Body Flap ceramico e le strutture di supporto in lega Ti6Al4V prodotta da CIRA mediante *Electron Beam Melting*, una specifica tecnica di *Additive Layer Manufacturing*. Anche in tal caso il CIRA ha qualificato il processo di manifattura secondo le linee guida ECSS. In Figura 6 è riportata una vista di assieme del sottosistema Body Flap di Space Rider.

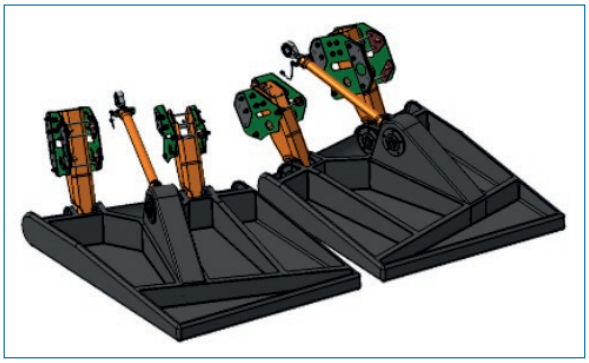


Figura 6; Sottosistema superfici di controllo Space Rider (Fonte: CIRA / Thales Alenia Space in Italia)

La fase di sviluppo ha incluso l'esecuzione di numerose campagne di test presso gli impianti del CIRA (caratterizzazione del materiale rispetto alle condizioni ambientali di missione (ivi inclusa la fase orbitale) e validazione del design rispetto ai carichi termomeccanici attesi attraverso test dinamici e statici).
Sono attualmente in fase di completamento della manifattura i modelli di qualifica del Nose, di 4 Shingles, dell'Hinge TPS e del Body Flap ed a breve avrà inizio la fase di qualifica. La Figura 7 mostra alcuni Engineering Models realizzati durante le attività di sviluppo.



Figura 7: Engineering Models of Body Flap, Nose, Shingle e Hinge TPS (Fonte: CIRA / Thales Alenia Space in Italia)

Un'ulteriore classe di materiali ceramici, adatta all'uso in applicazioni ad altissima temperatura, è costituita dai cosiddetti UHTC (Ultra High Temperature Ceramics), che 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 erano stati identificati come 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 (ISSMC-CNR, Rina Consulting – Centro Sviluppo Materiali S.p.A., CIRA e Università).

Negli ultimi 20 anni sono stati progettati e realizzati componenti di piccola e



Figura 8: Capsula EXPERT durante l'integrazione e i test finali (Fonte: Thales Alenia Space in Italia)

media e condotti numerosi test sia in gallerie del vento al plasma che in reali condizioni di volo. Nell'ambito del progetto europeo EXPErimental Reentry Testbed (EXPERT, Figura 8)), gestito da Thales Alenia Space in Italia 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 9), lanciata nel 2010 dal razzo sonda europeo MAXUS-8, è stato testato un cono aguzzo in UHTC in volo e nel 2013, CIRA ha realizzato un'altra coppia di alette, composte sia di materiali ceramici sia di parti metalliche rivestite in ceramico nell'ambito del progetto australiano SCRAMSPACE (Figura 10).

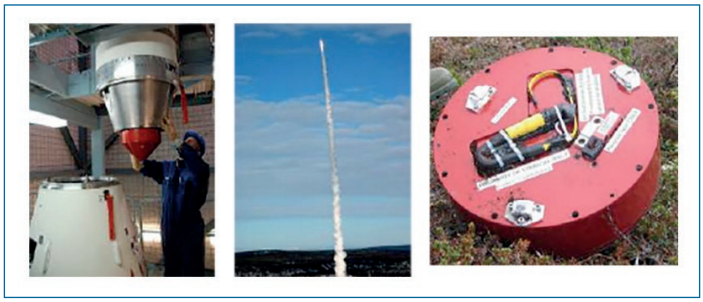


Figura 8: Capsula EXPERT durante l'integrazione e i test finali (Fonte: Thales Alenia Space in Italia)

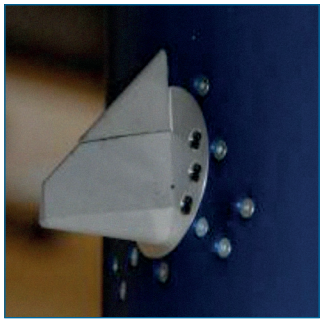


Figura 10: SCRAMSPACE Winglets Assemblato al CIRA e integrato sul veicolo di lancio (Fonte: CIRA)

Dopo anni di sperimentazione sugli UHTC massivi a causa della loro bassa tenacità a frattura si è deciso di utilizzarli come rivestimento per migliorare la resistenza all'ossidazione di substrati metallici o ceramici e più recentemente la ricerca si è orientata verso lo sviluppo di compositi ceramici con matrici UHTC e fibro-rinforzate, i cosiddetti UHTCMC (Figura 11).

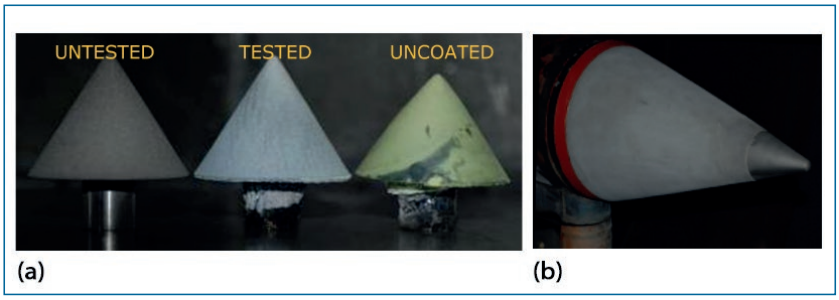


Figura 11: Un campione metallico rivestito in UHTC. Diversi esemplari rivestiti (a). Un prototipo in scala reale di Nose con estremità in UHTC (b). (Fonte: CIRA)

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 americano (AFRL) (Figura 12 e Figura 13).
Per quanto riguarda gli UHTCMC, ISSMC-CNR è stato capofila del progetto H2020 CHARME³ che vede coinvolti anche l'Università di Napoli Federico II e AVIO come partner italiani; tra i partner stranieri spiccano DLR e Ariane Groupe.

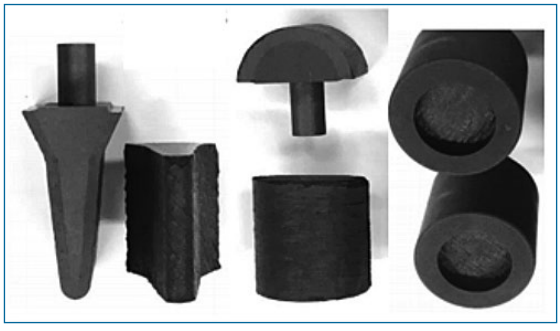


Figura 12: Campioni di piccola scala di Substrati in CMC con rivestimento in UHTC (Fonte: CIRA)



Figura 13: Dimostratori larga scala di termospruzzatura di rivestimenti in UHTC su substrati metallici (Fonte: CIRA)

L'obiettivo è di innalzare il TRL di tale tecnologia per applicazione ai sistemi di protezione termica e per la propulsione. Recentemente l'ASI ha finanziato un'attività coordinata dal Politecnico di Milano con la partecipazione di Petroceramics, CNR-ISSMC e CIRA, tesa alla modellazione avanzata di materiali CMC e UHTCMC. In tale contesto sono state condotte numerose indagini sperimentali associate alla ricostruzione numerica per la comprensione dei meccanismi di rottura di tali materiali (Figura 14).

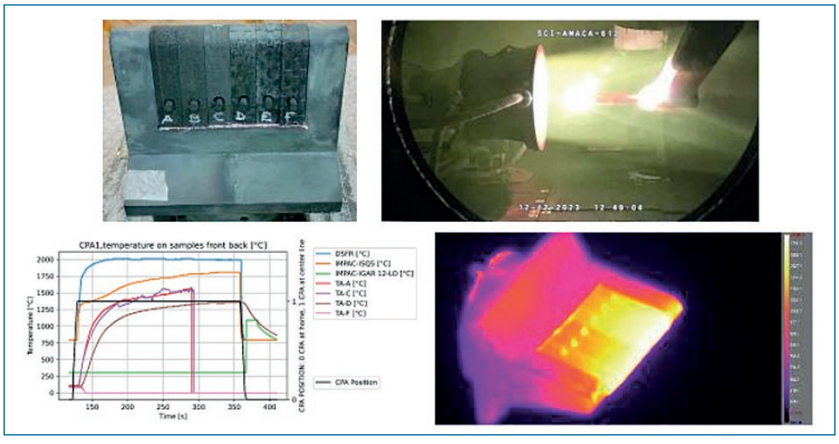


Figura 14: Bordi d'attacco in UHTCMC durante il test in SCIROCCO (Fonte: CIRA)

Nei rientri veloci tipici dei rientri da missioni interplanetarie ovvero rientri balistici, che prevedono quindi la dissipazione dell'energia cinetica per attrito con l'atmosfera in un breve lasso di tempo, le temperature raggiunte dagli scudi termici sono tali da ritenere indispensabili l'utilizzo di materiali ablativi.

I materiali ablativi soggetti ad elevati flussi termici garantiscono l'isolamento termico della struttura mediante una serie di trasformazioni chimico-fisiche (e.g. pirolisi, outgassing, ablazione) che permettono lo smaltimento di parte del carico termico.

Gli scudi termici ablativi, degradandosi durante il rientro, non sono riutilizzabili e devono essere sostituiti o ripristinati ad ogni missione.
In Europa sono disponibili alcune soluzioni tecnologiche per gli ablativi. Il P50, ad esempio, è basato su sughero impregnato con resina fenolica che viene utilizzato da oltre 50 anni sui booster dei lanciatori, così come l'SV2A (a base di Silica) prodotto ed utilizzato da AVIO sui lanciatori Ariane e VEGA.

Guardando ad ablativi ad elevate prestazioni, di particolare interesse sono 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 a 250 kg/m3), riescono a sostenere efficientemente flussi termici molto elevati, anche maggiori di 10 MW/m^2.

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 proprio su ablativi carbon-fenolici (Figura 15) 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 laboratorio sia in *Plasma Wind Tunnel*. L'utilizzo di matrici rinforzate (Figura 16) con nanoparticelle ceramiche permette, ad esempio, di ridurre significativamente sia la velocità di ablazione che la conducibilità termica dello scudo termico ablativo.

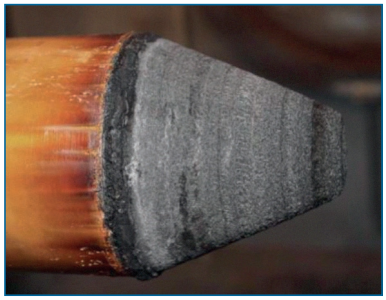


Figura 15: Campione in materiale ablativo testato nell'impianto PWT Scirocco (Fonte: CIRA)

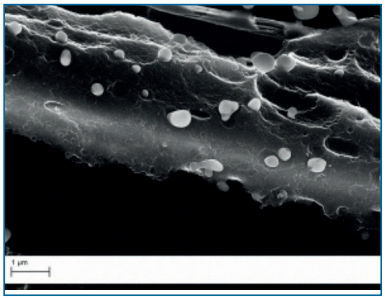


Figura 16: Nanoparticelle disperse nella matrice di un materiale ablativo (Fonte: Dip.Ingegneria Chimica, Materiali Ambiente, Università La Sapienza di Roma).

Protezioni termiche gonfiabili

Recentemente una tecnologia di notevole interesse è rappresentata dai sistemi di protezione termica gonfiabili.

Diversamente dagli scudi termici rigidi, gli Scudi Termici Gonfiabili o Inflatable Heat Shields (IHS) utilizzano soluzioni strutturali e di protezione termica flessibili, che possono essere ripiegate durante il lancio, permettendo di utilizzare scudi di grandi dimensioni, indipendentemente dalle dimensioni imposte dal lanciatore. Dopo la separazione dal vettore, queste strutture sono gonfiate per offrire una superficie molto più ampia, consentendo una decelerazione graduale durante il rientro atmosferico (grazie a un basso coefficiente balistico). Ciò comporta una riduzione dei carichi aerodinamici e termici durante il rientro, favorendo un mag

gior carico utile e una più ampia fattibilità della missione rispetto alle soluzioni convenzionali di rientro. I sistemi IHS hanno applicazioni sia in missioni di rientro sulla Terra sia su Marte. Per quanto riguarda le applicazioni terrestri, possono permettere il recupero da orbite basse ed il riutilizzo di risorse spaziali (e.g. stadi dei lanciatori, carichi utili della ISS, satelliti riutilizzabili), aumentando la sostenibilità delle attività spaziali, ma anche contribuendo a soddisfare i requisiti di Clean Space per la rimozione dei detriti di oggetti che, al termine della loro vita operativa (EOL), resterebbero in orbita. Inoltre, la tecnologia dei deceleratori gonfiabili è scalabile e può essere utilizzata per portare grandi carichi su Marte, per esempio, permettendo l'esplorazione umana di altri pianeti. In entrambi i casi, gli IHS rappresentano una tecnologia chiave in grado di abilitare soluzioni attualmente irrealizzabili con le tecnologie convenzionali.

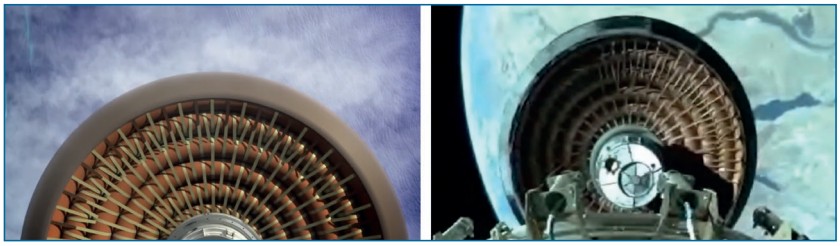


Figura 17: Missione NASA IHS-LOFTID. Computergrafica (sinistra) e foto del sistema durante la missione (destra)

Di recente, il potenziale ruolo degli IHS per rendere i sistemi di trasporto spaziale riutilizzabili flessibili è stato dimostrato con successo dalla NASA con la missione del dimostratore tecnologico "LOFTID", lanciata nel novembre del 2022, dopo uno sforzo significativo di sviluppo al suolo. Questo test ha dimostrato in volo la possibilità di rientrare in modo sicuro, riportare sulla Terra e recuperare un carico utile, utilizzando una soluzione completamente basata sulla tecnologia IHS. Il prossimo passo del programma della NASA prevede la dimostrazione del recupero di uno degli elementi principali del sistema di lancio, come il motore principale del primo stadio del Vulcan della ULA.

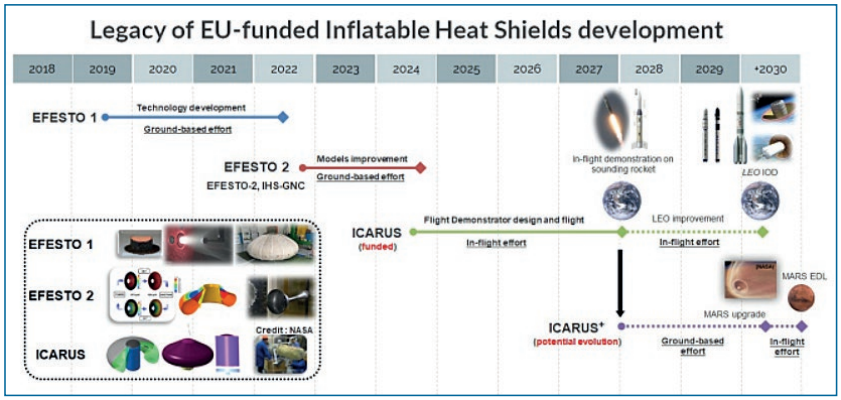


Figura 18: Roadmap dello sviluppo europea dei sistemi IHS (Fonte: EFESTO and EFESTO-2)

Il CIRA è coinvolto nello sviluppo della tecnologia IHS sin dal 2018. Due progetti già conclusisi con successo, EFESTO ed EFESTO-2, finanziati dalla Commissione Europea nell'ambito del programma Horizon 2020 (H2020), costituiscono una solida base. Attualmente, il CIRA è responsabile dello sviluppo e test del TPS flessibile nel progetto ICARUS, il terzo progetto europeo nel campo degli Scudi Termici Gonfiabili come soluzione innovativa per il recupero degli stadi dei lanciatori.

EFESTO è stato il primo progetto focalizzato allo sviluppo tecnologico di sistemi di protezione termica gonfiabili che ha permesso di far crescere il know-how europeo nel campo degli IHS, elevando il livello di maturità tecnologica (TRL) delle tecnologie chiave da 3 a 4. Il Progetto EFESTO-2, iniziato nel novembre 2022, ha ampliato il lavoro di EFESTO con ulteriori analisi, test in galleria del vento, test statici e dinamici in laboratorio e simulazioni numeriche per raffinare i modelli e le tecnologie strutturali e termiche.

Il Progetto ICARUS mira invece a dimostrare a terra e in volo suborbitale un prototipo di IHS, portandolo a un TRL ≥ 6. Due sono gli obiettivi principali: il primo è un test in galleria del vento al plasma SCIROCCO del CIRA di un IHS in scala ridotta,

in un ambiente aerotermico rappresentativo di un rientro da LEO. Il secondo è un test di volo suborbitale di un IHS di 3 metri di diametro per verificare il comportamento aerodinamico del sistema durante il rientro, dal regime ipersonico a quello subsonico. Con ICARUS, l'Europa si pone l'obiettivo di consolidare una tecnologia IHS completamente europea, affermando la propria presenza nel campo strategico del rientro e del recupero di payloads da LEO e, potenzialmente, anche per missioni su Marte.

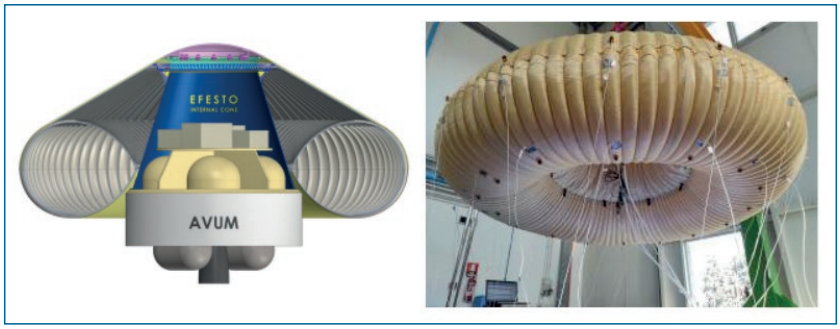


Figura 19: IHS progettato nell'ambito di EFESTO per il recupero dello stadio AVUM di Vega (sinistra) e struttura gonfiabile realizzata in EFESTO e durante la campagna di test statici e dinamici al CIRA del progetto EFESTO-2 (destra) (Fonte: EFESTO ed EFESTO-2)

Protezioni termiche dispiegabili – IRENE

Un'altra tecnologia di forte interesse nell'ambito dei sistemi di protezione termica riguarda gli scudi termici dispiegabili. Analogamente ad un sistema gonfiabile, uno scudo termico dispiegabile offre vantaggi significativi per il rientro atmosferico, garantendo una superficie più ampia con un parametro balistico inferiore, che a sua volta riduce i picchi sia di carico aerodinamico sia di carico termico, consentendo così l'utilizzo di una gamma più ampia di materiali per lo scudo stesso. I sistemi dispiegabili sono più efficaci rispetto a quelli gonfiabili per scudi termici con diametri dispiegati fino a 2÷3 metri, per i quali la complessità dei sistemi di gonfiaggio e delle tubazioni non è giustificata. Oltre tali dimensioni, la lunghezza delle aste e le forze aerodinamiche, proporzionali alla superficie dello scudo, tendono a indurre instabilità strutturali. Un vantaggio dello scudo termico

dispiegabile è la riduzione del peso del TPS flessibile, poiché quest'ultimo è in contatto con una parte limitata della struttura rigida e quindi richiede meno potere isolante. Gli scudi termici gonfiabili sono invece più efficaci per diametri dispiegati maggiori, dove lo spessore della struttura può rimanere quasi invariato e la dimensione più grande influisce solo sulla massa del sistema di stoccaggio/generazione del gas di gonfiaggio.

Un importante risultato per quanto riguarda i sistemi di protezione termica dispiegabili, basati su materiale flessibile, è stato raggiunto con il progetto Mini-Irene. Mini-IRENE Flight Experiment (MIFE) è una capsula di rientro a geometria variabile che deve resistere ai carichi di rientro da orbita terrestre bassa. MIFE è stato finanziato dall'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) e gestito dall'Agenzia Spaziale Europea (ESA) nel quadro di un GSTP (General Support Technology Program). Il progetto mirava alla maturazione di una tecnologia innovativa per il rientro atmosferico fino a TRL 6, sviluppata dalle aziende del consorzio ALI, CIRA e Università degli Studi di Napoli "Federico II", nell'ambito del più ampio progetto IRENE (Italian Re-Entry NacellE), una capsula di rientro dotata di un innovativo scudo termico dispiegabile con un coefficiente balistico molto basso che ha consentito l'utilizzo di materiali standard per il sistema di protezione termica, per carichi termo-meccanici accettabili durante la fase di discesa. Il programma IRENE mirava allo sviluppo di una capsula di rientro a basso costo, in grado di riportare sulla Terra carichi utili dalla ISS e/o missioni scientifiche di breve durata in orbita terrestre bassa (LEO). MIFE ha rappresentato l'ultima fase del programma IRENE, con gli obiettivi di progettare e testare un *Ground Demonstrator* (GD) per la qualifica termica in una galleria al plasma, e di realizzare un *Flight Demonstrator* (FD) per la qualifica in volo ai carichi meccanici.

Di seguito sono descritti i principali risultati del volo di qualifica del *Flight Demonstrator*, una capsula lanciata con un sounding rocket il 23 novembre 2022 durante la campagna SSC S1X3-M15. Tutti i test di qualifica del *Flight* e del *Ground Demonstrator* sono stati eseguiti con successo. Il GD è stato qualificato nel Plasma

Wind Tunnel "Scirocco" del CIRA per i carichi termici di una specifica missione di rientro. Il FD ha raggiunto con successo i due obiettivi principali del volo suborbitale sopra menzionati dopo la separazione dal razzo sonda, ovvero la verifica della stabilità in ogni regime di volo e la resistenza dello scudo termico ai carichi meccanici dovuti all'impatto con l'atmosfera.

La capsula (FD) è costituita da un vano cilindrico, contenente tutta l'avionica, ed esternamente da un sistema "a ombrello" dispiegabile meccanicamente, che funge sia da freno aerodinamico che da sistema di protezione termica (TPS). Il meccanismo di attivazione si basa su molle a gas appositamente qualificate per il volo. Il TPS flessibile è costituito da tre strati di tessuto ceramico Nextel®, mentre il Nose è costituito da un elemento composito di ossido ceramico come componente strutturale, ricoperto da una schiuma ceramica per l'isolamento termico. Per la fase di lancio la capsula è stata stivata all'interno di un guscio esterno composto da tre pannelli e poi collegato al meccanismo di bloccaggio e sgancio del lanciatore.

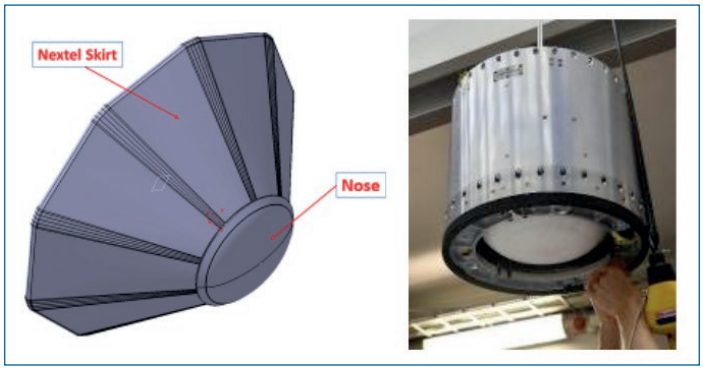


Figura 20: CAD della capsula mini-IRENE dispiegata (sinistra) e capsula stivata prima del lancio (destra) (Fonte: CIRA)

Per dimostrare la fattibilità della tecnologia dispiegabile in ambiente reale, è stato previsto un volo suborbitale con rilascio da razzo sonda. La capsula era montata nello stadio intermedio tra il secondo stadio e il payload principale del lanciatore. Secondo i calcoli progettuali, la missione prevedeva un volo parabolico fino ad un apogeo di circa 260 km, con basso numero di Mach ipersonico e picchi di decelerazione pari a 12g.

Gli obiettivi di alto livello della missione del FD di mini-IRENE sono stati: i) sopravvivere al lancio; ii) separarsi dal razzo; iii) dispiegare lo scudo termico prima della fase di rientro; iv) mantenere la stabilità aerodinamica e l'integrità strutturale durante il volo; v) acquisire e memorizzare dati durante il volo (pressioni, temperature, accelerazioni, assetto); vi) sopportare (solo il carico utile) le condizioni ambientali di rientro che consentano il recupero dei dati raccolti in volo; vii) essere localizzata e recuperata dopo l'atterraggio.

Il volo ha fornito un ampio set di dati telemetrici, tra cui misurazioni GPS, di assetto, di temperatura e accelerazione. La capsula con scudo termico dispiegabile ha inoltre dimostrato una ottima stabilità aerodinamica in tutti i regimi di volo. Nelle seguenti figure vengono riportati Mini-Irene nel modulo di eiezione del *Sounding Rocket* (visibile il Nose), il Sounding Rocket integrato prima del lancio dalla base spaziale di Esrange di SSC in Svezia, la fase di lancio dalla torre di lancio e la capsula recuperata dopo l'atterraggio.

Il GD di Mini-Irene è stato qualificato con successo nel Plasma Wind Tunnel "Scirocco" del CIRA, sottoponendo il modello ad un flusso termico al punto di ristagno derivato una traiettoria di rientro orbitale nominale, pari a 219 kW/m2 (in condizioni di parete non catalitica).



Figura 21: Mini-Irene (FD) integrato nel Lanciatore ed il Lancio da Esrange (Svezia) (Fonte: CIRA)



Figura 22: FD di Mini-Irene dopo l'atterraggio dopo il volo da Sounding Rocket (Fonte: CIRA)

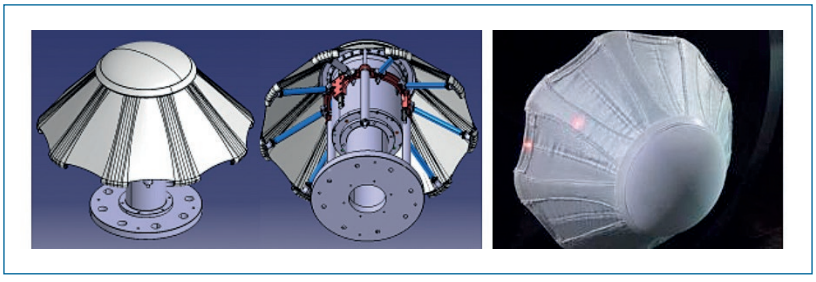


Figura 23: Modello CAD del GD (sinistra) e modello reale prima del test (destra) (Fonte: CIRA)

La condizione di "Scirocco" scelta (H0=10.8 MJ/kg, P0=2.5 bar) è stata tale da riprodurre il flusso di calore nominale al punto di ristagno (215 kW/m2 dalla ricostruzione CFD), e la durata del test è stata scelta in modo da riprodurre lo stesso carico termico del volo. Oltre a quella nominale, è stata scelta anche una traiettoria più ripida per la definizione del carico termico e del conseguente tempo di prova. La traiettoria più ripida sperimenta un picco termico più elevato, ma un carico termico complessivo inferiore (si veda la Tabella 1).

Trajectory	Initial altitude [km]	Initial flight path angle [deg]	Peak heat Flux [kW/m²]	Heat load [MJ/m²]
Nominal	300	0	219	36.8
Steeper trajectory	300	-1.5	258	29.9

Tabella 1: Traiettoria, velocità, picco termico e carico termico

Il GD è stato sottoposto al flusso di plasma nelle condizioni sopra menzionate per un tempo di circa 180 secondi, e le immagini seguenti mostrano l'articolo in prova durante il test e subito dopo il completamento dello stesso.

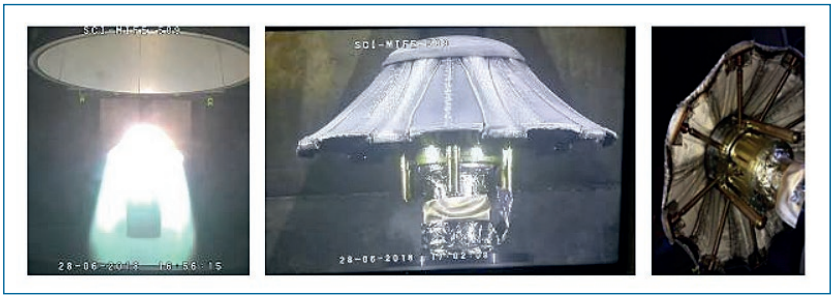


Figura 24: Il GD di mini-IRENE durante il test (sinistra) e dopo i tre minuti di test in "Scirocco" (centro e destra) (Fonte: CIRA)

Il TPS realizzato in tessuto è la tecnologia più impegnativa del progetto Mini-Irene. Nell'immagine seguente è riportata la visualizzazione della temperatura acquisita dalla termocamera in molti punti della superficie esterna del TPS. La temperatura misurata è pienamente conforme al modello termico presentato e alla distribuzione della temperatura.

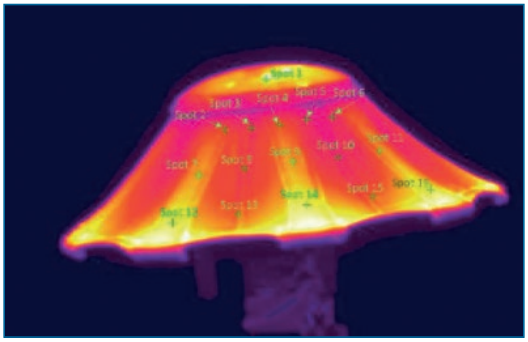


Figura 25: Immagine IR durante il test in "Scirocco" (Fonte: CIRA)

Le ispezioni post-test hanno confermato che anche il tessuto ha reagito al carico termico come previsto. Il primo dato evidente è stato che il multistrato dello skirt risultava ancora teso su tutta la sua superficie dopo il test in "Scirocco". Inoltre, lo strato esterno ha mostrato comunque buone prestazioni per quanto riguarda il livello di elasticità residua. Infine, nessun problema è stato osservato anche per quanto riguarda gli interni e la *Payload Bay*: l'andamento della temperatura delle termocoppie ha confermato la compatibilità dell'ambiente termico della *Payload Bay* con l'installazione di qualsiasi elettronica o Payload (in caso di IRENE missione) all'interno.

In conclusione, le qualifiche separate del GD in ambiente rilevante (PWT "Scirocco") per i carichi termomeccanici di rientro e del FD dopo rilascio da Sounding

Rocket per i carichi meccanici durante il rientro, hanno completato la qualifica del TPS flessibile e del sistema di dispiegamento fino ad un TRL pari a 6. Lo step successivo è la qualifica ad entrambi i carichi di cui sopra mediante un'unica missione di rientro da orbita (IRENE) ed il conseguente TRL 8 per la tecnologia.

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 attuale capacità di accesso autonomo allo spazio perseguita principalmente mediante lo sviluppo di tecnologie atte a ridurre la dipendenza da nazioni extra-europee;

2. lo sviluppo di nuovi sistemi di lanciatori riutilizzabili e sostenibili che riducano il gap creatosi nell'ultimo decennio con Stati Uniti (e Cina) e consentano all'Europa nel medio periodo un accesso indipendente allo spazio ed economicamente gestibile.

3. il rafforzamento del ruolo di primo piano nei sistemi, tecnologie e dimostratori di rientro in atmosfera terrestre, da LEO e/o da orbita cis-lunare, e in quella di altri pianeti del sistema solare;

4. 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 delle ultime Conferenza Interministeriale degli Stati Membri dell'ESA, sono stati confermati gli impegni dell'Italia quale nazione leader nello sviluppo del VEGA-C e del 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 proiettando le competenze nazionali verso un nuovo traguardo e del programma Leo Cargo Return Service che ha l'obiettivo sviluppare un servizio commerciale per il trasporto da e verso stazioni spaziali in orbita LEO ed in futuro anche da orbita cis-lunare con una prima missione dimostrativa entro il 2030.

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, con il progetto del *Lunar Gateway*, 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

Strutture avanzate

Per incrementare il payload di sistemi di rientro atmosferico occorre diminuire il peso delle strutture primarie, possibilmente a parità di costo, 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 in questi anni sta raggiungendo una piena maturità. Il CFRP, fra l'altro, non appare sostituibile, almeno nel medio periodo, con ulteriori innovazioni radicali in termini di materiale.

Tuttavia, va sottolineato che, sebbene il risparmio di peso teoricamente atteso dall'uso del CFRP rispetto all'alluminio possa raggiungere il 50%, ad oggi non sono stati messi a punto concetti strutturali e metodi realizzativi in grado di sfruttare al meglio tale prerogativa. Il miglioramento delle prestazioni reali

si limita tipicamente ad un risparmio di peso del 10-15% circa, ma con costi maggiori.

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 30), evoluzione naturale di IXV, finanziato e coordinato dall'ESA ha come obiettivo lo sviluppo di un sistema di rientro atmosferico riutilizzabile per 6 missioni, 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 - 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 di 650 kg di massa e fino a 600 W di dissipazione termica gestita tramite sistema a radiatore dispiegabile. 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 31), 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.

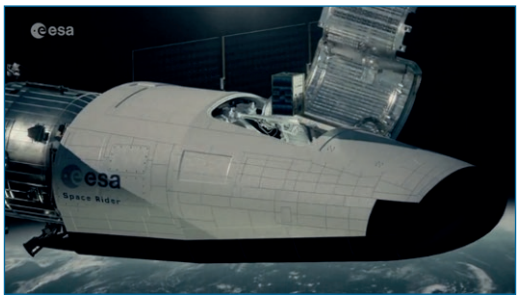
Al completamento della missione orbitale, il sistema *Space Rider* effettuerà le necessarie verifiche, temporale e spaziale per l'abbassamento dell'orbita identificando la migliore opportunità di rientro quando il piano orbitale intersecherà la zona del sito di atterraggio con una accuratezza inferiore 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.

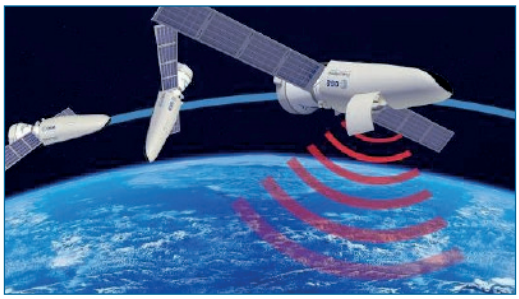
Il modulo di rientro dissiperà gradualmente la sua alta energia cinetica volando per circa 8.000 km sulla sua traiettoria di rientro controllata nell'atmosfera.
A circa 15 km di distanza dal sito di atterraggio e a 16 km di quota, sarà attivata l'apertura del primo paracadute stabilizzatore, che rallenterà il veicolo fino ad una velocità compatibile per l'apertura di un "parafoil" (Figura 32). 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 300 m. 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)



(c)

Figura 30: Space Rider: con Payloads Cargo Bay chiusa (a), con Payloads Cargo Bay aperta (b), missione tipica (c) (Fonte: Thales Alenia Space in Italia / AVIO / ESA)

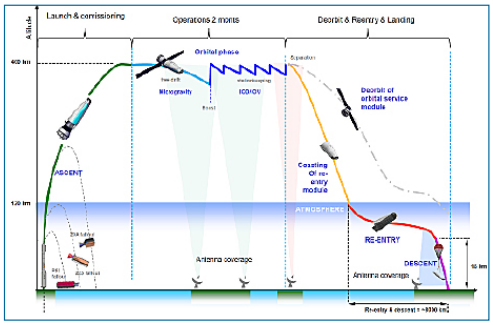


Figura 31: Space Rider, profilo di missione (Fonte: Thales Alenia Space in Italia)



Figura 32: Come Space Rider volerà sotto Parafoil (Fonte: Thales Alenia Space in Italia)

IXV, *Intermediate eXperimental Vehicle*, finanziato e coordinato dall'ESA, aveva 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 33).

L'Italia, attraverso l'ASI, è il principale contributore europeo del progetto che, l'11 febbraio 2015 (Figura 34), ha visto il suo coronamento con il successo della missione. Dopo essere stato rilasciato ad una quota di circa 320 km dal vettore VEGA,

il veicolo IXV ha iniziato la sua missione completamente autonoma raggiungendo una quota massima di 413 km per poi iniziare la fase di rientro all'interfaccia con l'atmosfera terrestre a 120 km di quota e con una velocità di 7,5 km/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 trasportò in Europa per l'effettuazione delle verifiche post-volo.



Figura 33: IXV integrazione con VEGA (Fonte: ESA)

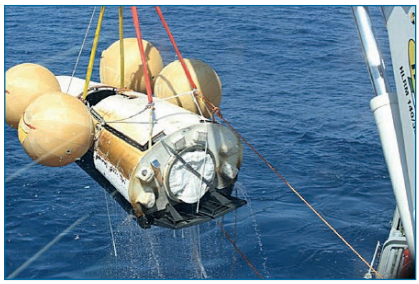


Figura 4: IXV: Recupero dopo il volo del febbraio 2015 (Fonte: ESA)

Thales Alenia Space in Italia, Prime industriale di IXV, che ha gestito tutte le attività di sistema, integrazione e implementazione della missione, si è avvalsa 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 35). 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 36) 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 - 2 principale - e le missioni Almasat-1 e i sette CubeSats. Nel 2013 è cominciata la sua 'vita commerciale'.

Tre anni dopo il primo lancio del Lanciatore Vega, Avio ha iniziato lo sviluppo del lanciatore Vega C (Consolidation). Il nuovo lanciatore è in grado di portare fino a 2.300 kg in orbita terrestre bassa, con un incremento del 60% rispetto al Vega. Inoltre, Vega C è più flessibile e versatile del suo predecessore, avendo la possibi-



Figura 35: USV1 (Fonte: CIRA)



Figura 36: VEGA wind tunnel test (Fonte: ELV)

lità di trasportare il 90% dei satelliti del mercato dell'orbita terrestre bassa, rispetto al 50% del Vega. Buona parte di questi satelliti potrà essere lanciata sfruttando la sua capacità di portare carichi utili multipli. Infatti, Vega C sfrutta a pieno le capacità del nuovo adattatore del carico utile SSMS (Small Spacecraft Mission Service) per trasporto di decine di microsatelliti in orbita terrestre bassa. Inoltre, è il vettore scelto per il primo lancio di Space Rider, veicolo spaziale riutilizzabile europeo.

La configurazione del Vega C, come quella del suo predecessore, ha tre stadi con motori a propellente solido e uno stadio con motore a propellente liquido: motore P120C per il primo stadio, Zefiro 40 per il secondo stadio, Zefiro 9 per il terzo stadio e motore a propellente liquido per il quarto stadio (AVUM modificato). Il volo inaugurale del Vega C è avvenuto il 13 luglio 2022. Attualmente è in atto un aggiornamento del design del motore del secondo stadio che sarà qualificato con il volo previstone nel quarto trimestre del 2024.

MATERIALI E PROCESSI

ARCHITETTURE STRUTTURALI AVANZATE ULTRALEGGERE E ADATTIVE

Le strutture ultraleggere e adattive sono una possibile soluzione alle sfide economiche contemporanee per l'accesso e l'esplorazione dello Spazio. Progettate con metodi non convenzionali e basate anche sull'uso di materiali e processi innovativi, sono ormai diffuse in varie tipologie: si passa dalle strutture gonfiabili a quelle termoelastiche ultra-stabili, dai sistemi morphing (strutture a forma variabile) a sistemi di dispiegamento cinematici anche basati su sistemi gonfiabili. 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[1] o le strutture basate sulla progettazione multiscala[2] sono in grado di garantire deformazioni altrimenti inaccessibili. Inoltre, l'uso di materiali polimerici modificati uniti a soluzioni progettuali innovative permette 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 microdistorsioni 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 e resistenze molto elevate.

[1] *Mirzaali, M. J., et al. Shape-matching soft mechanical metamaterials, Scientific Reports 8.1, 2018: 965*

[2] *Neville, R. M., et al. A Kirigami shape memory polymer honeycomb concept for deployment, Smart Materials and Structures, 26.5, 2017: 05LT03*

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 problemi. Polimeri modificati sono alternative valide a materiali classici e costosi come il Berillio, lo Zerodur e materiali ceramici 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 in capsule e veicoli di rientro abbinandole a strati di materiale ablativo, 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.

Questi concetti richiedono anche 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 di 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 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 pressoché 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 rinforzati 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 struttura "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 diametro 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 e del suo utilizzo interno come compartimentazione di volumi è riportato in Figura 1[3]. Tali soluzioni sono adottabili anche per l'insediamento di avamposti su pianeti o lune: in questo caso, la presenza umana prolungata richiede infatti volumi abitabili dedicati a diverse funzioni e le strutture gonfiabili offrono questa possibilità a fronte di un volume molto contenuto al lancio rispetto all'equivalente di strutture rigide.

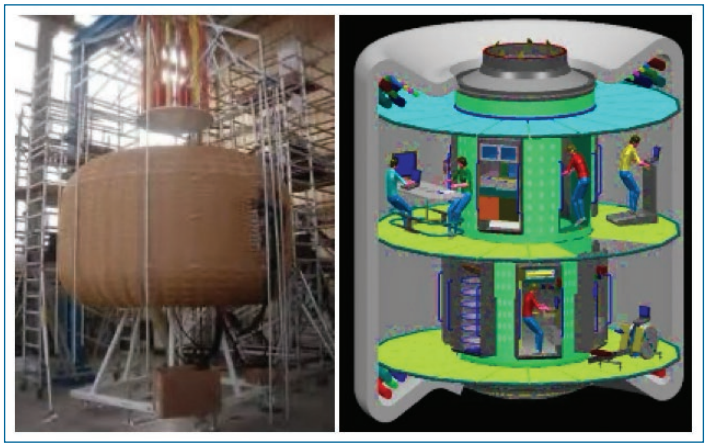


Figura 1 : prototipo di modulo abitato gonfiabile (programma esa)
(Fonte: THALES ALENIA SPACE, ARES COSMO, ESA)

Per le future Stazioni Spaziali o futuri Avamposti di superficie si prevede inoltre un massiccio utilizzo dei cosiddetti airlock per le attività extraveicolari (Figura 2[4]). Per questi elementi, soggetti a pressurizzazione e depressurizzazione, la tecnologia del gonfiabile/espandibile si presta in maniera ottimale.

[3] *Design, Verification and Manufacturing Aspects Relevant for Inflatable Modules – ESA AO/14788/05/NL/IA*

[4] *STEPS2 - Progetto cofinanziato dalla U.E. sulla Misura Piattaforme Innovative, POR FESR 2007/2013, Fase 2*

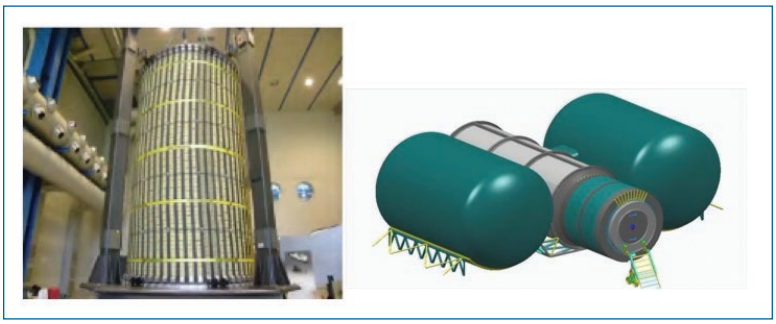


Figura 2 : Dimostratore di Airlock gonfiabile/espandibile (Programma regionale steps2)
(Fonte: THALES ALENIA SPACE ITALIA, ARES COSMO & ESA)

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 dispiegabili 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) riportati nelle Figure 3 e 4, determinando una riduzione drastica di tempi e costi tra due missioni successive (turn around, p.e., X-37, USA).



Figura 3 : IXV Veicolo di Rientro (Fonte: ESA)

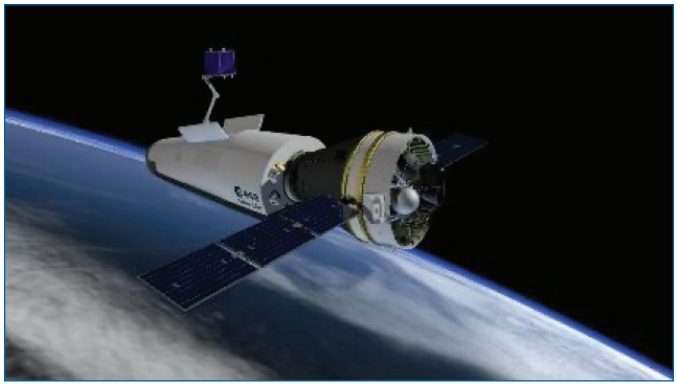


Figura 4 : Space Rider Veicolo di Rientro (Fonte: ESA)

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 di 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

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. La NASA ha investigato sin dal 1960 la possibilità di adottare sistemi dispiegabili per applicazioni spaziali con l'obiettivo di migliorare la manovrabilità di veicoli da rientro. Nel progetto americano ADEPT (Adaptable Deployable Entry and Placement Technology) è stato eseguito nel 2018 un primo test di rientro atmosferico mediante l'utilizzo di uno scudo termico dispiegabile. Il CIRA, insieme all'Università di Napoli ed il consorzio ALI, ha sviluppato un prototipo di capsula con scudo dispiegabile che è stata testata in due dimostratori diversi, ai carichi termo-strutturali in un Plasma Wind Tunnel ed a quelli di pressione dinamica attraverso volo suborbitale da sounding rocket, entrambi tipici di una specifica missione di rientro atmosferico, riportati nelle Figure 3.5 e 3.6 rispettivamente. In particolar modo la missione di volo ha anche dimostrato la stabilità dell'attuale configurazione ed angolo di capsula a tutti i regimi di moto, per il supersonico fino a Mach 7 ed in particolare il regime più critico del transonico. La qualifica in contesti separati ha consentito

alla tecnologia, prevalentemente basata sull'utilizzo di materiali CoTS (meccanismo di dispiegamento e scudo termico flessibile/rigido), di raggiungere il TRL (Technology Readiness Level) 6; il prossimo step della tecnologia è la realizzazione di un dimostratore più grande per una missione di rientro effettiva da orbita e la qualifica simultanea ad entrambi i carichi.



Figura 5 : Mini-Irene (Dimostratore per Pwt) durante e dopo il test



Figura 6 : Terra ripresa da 250km dalla on-board camera di Mini-Irene (dimostratore di volo suborbitale) durante la fase di micrigravita' pre-rientro su terra

Nell'ambito del Protocollo Esecutivo di Cooperazione Scientifica e Tecnologica Bilaterale tra Italia e Brasile, finanziato dal Ministero degli Affari Esteri e della Cooperazione Internazionale (MAECI) nel triennio 2022-2024, CIRA ed Università di Brasilia sono inoltre impegnati nello sviluppo di un nuovo concept di scudo termico adattivo dispiegabile che integra elementi attivi in smart materials, con proprietà di shape memory, per consentire traiettorie di rientro adattive, una maggiore manovrabilità e precisione in atterraggio attraverso il controllo attivo

della forma dello scudo termico. Lo sforzo tecnologico del progetto SPLASH si focalizza sull'analisi di tali capacità, non pienamente garantite dagli attuali concetti di deceleratori rigidi o gonfiabili disponibili in letteratura, mediante una progettazione di sistema supportata da modellistica numerica e attività di ricerca sperimentale finalizzata alla ottimizzazione della risposta termo-strutturale del sistema accoppiato, costituito dallo scudo termico flessibile e dal meccanismo di dispiegamento con capacità di morphing, durante le fasi di ingresso, discesa e atterraggio.

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. 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 7 di un veicolo di rientro di classe 2500 kg con ali dispiegabili tale da poter essere alloggiato nel cargo del lanciatore VEGA C (Figura 8). 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.



Figura 7 : USV3 DWS Concept design (Fonte: CIRA)

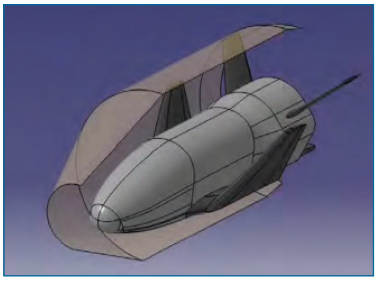


Figura 8 : USV3 DWS within vega fairing – wings deployed housing - wing stowed (Fonte: CIRA)

Nel campo delle strutture gonfiabili, l'italiana Ares Cosmo ex Aerosekur, vanta un notevole knowhow 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 e d HIAD – Hypersonic Inflatable Aerodynamic Decelerator) e dall'ESA (programma I RDT – Inflatable Re Entry and Descent Technology).
L'attenzione dimostrata dall'aeronautica mondiale per le strutture a forma variabile o morphing ha consentito la messa a punto di tecnologie industrialmente mature per strutture alari deformabili, potenzialmente trasferibili anche a future applicazioni spaziali. Nel settore, l'Italia (per es. CIRA, Università di Napoli, Politecnico di Milano) vanta un know-how di livello internazionale nello sviluppo di sistemi strutturali adattivi per migliorare le prestazioni di velivoli regionali. Nel programma Europeo Clean Sky 2 GRA-IADP (Green Regional Aircraft – Integrated Aircraft Development Programme), il CIRA, insieme ad un consorzio di circa venti partner, ha coordinato lo sviluppo operativo di sistemi adattivi per il miglioramento delle prestazioni e della ipersostentazione per ali di nuova generazione (progetto AirGreen2 – AG2). Le tecnologie sviluppate sono state verificate in ambiente rappresentativo (wind tunnel) e a terra, preparando la strada alla dimostrazione finale in volo.

RISORSE ECONOMICHE NECESSARIE

Le strutture avanzate ultraleggere e 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.

ADDITIVE MANUFACTURING

La tecnologia Additive Layering Manufacturing" (ALM, spesso semplificato in **AM**) realizza il concetto di creare una parte mettendo per strati successivi il materiale dove serve. Questo approccio è detto l'appunto "additivo" in contrapposizione del tradizionale processo "sottrattivo" che realizza la forma finale del pezzo per rimozione di materiale.
Nata come una tecnologia di "fast-prototyping", cosa che ancora oggi continua a declinare ma con caratteristiche di accresciuta capacità dimostrativa, l'insieme di queste tecnologie continua il processo di consolidamento in chiave industriale di cui sono evidenti i vantaggi inerenti: risparmio di materiale, pezzi con forme complesse non economicamente fattibili con le lavorazioni classiche, facile "customizzazione" dei prodotti, efficienza produttiva per piccole serie o per singoli pezzi ed annullamento virtuale del magazzino parti (stampa "on-demand", sulla base del relativo *file*).

Il ventaglio delle tecnologie che oggi realizzano la frontiera "additiva", continua ad espandersi in molti ambiti sia di R&S che industriali, quest'ultimi sia come nuovi obiettivi realizzativi che come ottimizzazione delle soluzioni esistenti. Al contempo molti processi di stampa si sono definitivamente stabilizzati in termini di qualità e di ripetitività dei risultati.
Tuttavia sarebbe sbagliato pensare all'AM come una tecnologia facile o che magicamente abbia già risolto ogni risvolto pratico della sua applicazione. Sempre opportuna è una valutazione costi/benefici nel confronto con i metodi di produzione tradizionali.

Questa tecnologia (useremo per praticità, di qui in poi, la dicitura al singolare) è un pilastro della Fabbrica 4.0 e come "direct digital manufacturing" rappresenta il terminale realizzativo (in termini fisici) di un processo completamente digitale a monte, esaltandone la flessibilità.

Tipicamente pezzi complessi (Figura 1) da realizzare in piccole serie sono oggi

potenzialmente convenienti in tecnologia AM piuttosto che le produzioni seriali di parti semplici che rimango di appannaggio dei metodi tradizionali.

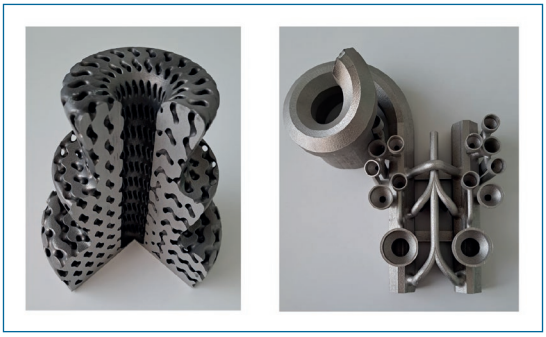


Figura 1: Esempi di geometrie complesse in stampa metallica (Fonte: AM Solutions)

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.

Importante è anche l'aspetto dei tempi di realizzazione, generalmente molto a favore dell'AM, quando in presenza di complessità morfologiche o realizzative o, meglio ancora, quando il pezzo stampato realizza funzionalmente la sintesi di più parti singole ottenute per via tradizionale.
E' il caso della motoristica dei lanciatori dove la complessità funzionale e morfologica delle parti, unita alla specificità dei materiali soggetti in taluni casi anche ad altissime temperature, porta generalmente ad assiemi molto complessi in termini di numero di parti.

In tal senso un valido use case dell'AM viene dallo studio di leghe innovative e dei relativi processi per la produzione di componenti destinati alla propulsione a liquido, di cui un esempio concreto è il motore M10 (Figura 2) che avrà le prestazioni necessarie per assicurare la propulsione del terzo stadio del futuro VEGA E,

permettendo altresì un innovativo design termodinamico in grado di assicurare un elevato impulso specifico.

A questi aspetti puramente tecnici si aggiungono le forti economie di processo permesse dall'AM quando il confronto è esteso a tutti gli aspetti sia della parte di progetto che di produzione: abbattimento della documentazione tecnica, della logistica di produzione/ componentistica e dei fornitori, del magazzino parti ed, infine, degli sfridi di lavorazione.



Figura 2: Motore M-10 del terzo stadio del VEGA E (Fonte: Avio)

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, etc…), è ormai assodato un ampliamento applicativo dell'AM nell'ambito delle strutture di satellite.



Figura 3: Struttura della Piattaforma Nimbus "New Italian Micro Bus" (Fonte: Thales Alenia Space-Italia)

Un esempio che oggi pienamente concretizza tutti gli aspetti sopra citati è la realizzazione della struttura di piattaforme spaziali per piccoli satelliti di nuova generazione (Figura 3) basata su *building block* impilabili aventi funzioni di struttura primaria e secondaria integrate. Questi elementi a valenza meccanico/strutturale ma anche termica, adottano una struttura "*lattice*" in alluminio e sono stampati con tecnologia SLM.

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". E' 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. riduzione dei 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, oggi peraltro sempre più connessa con la robotica a 5/6 gradi di libertà per tutti i processi di stampa che possono avvenire in presenza di aria.

Nell'ambito della Smart Factory l'AM dei tecno-polimeri si pone come tecnologia centrale potendo supportare tanto la fase prototipale, eliminando la laboriosa sequenza degli stampi ed accorciando drammaticamente la fase di validazione (approcio "first fail"), che quella di produzione. In quest'ultima, eventuali modifiche al pezzo per supportare la evoluzione del prodotto, possono essere introdotte senza gli impatti di costi e tempi normalmente associati alla modifica delle attrezzature di produzione e all'aggiornamento della documentazione tecnica.

Nelle fasi di produzione, per le tipologie di prodotto interessate (e si può ipotizzare a maggiore valore aggiunto), si potranno più proficuamente impostare proces-

si "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). La possibilità di dare ad un oggetto, fin dalla sua realizzazione, oltre alla forma anche determinate proprietà elettriche o magnetiche, magari solo in specifiche zone, apre ad un mondo di possibili applicazioni intelligenti. Tra questi si

possono citare i nuovi compositi a matrice polimerica con proprietà magnetiche, materiali realizzati inserendo cariche magnetiche hard o soft (metalliche o ceramiche) all'interno di un tecnopolimero come per esempio il PEEK), al fine di ottenere prestazioni magnetiche unite a valevoli prestazioni meccaniche (es. in Figura 4).

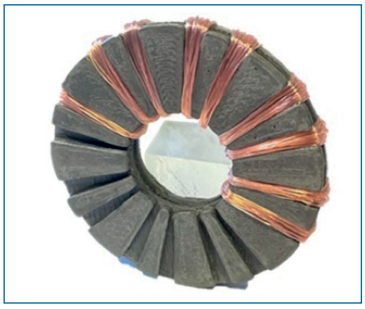


Figura 4: Esempio di motore elettrico con statore in C-Peek "magnetico" (Fonte: Gruppo Scienza e Tecnol. dei Materiali, Dip.to Ing. dell'Impresa, Università Roma Tor Vergata)

STATO DELL'ARTE

Per fare il punto sulle tecnologie dell'AM in ambito spaziale, saranno analizzati i seguenti aspetti:

- l e tendenze applicative
- le tecnologie di processo
- la frontiera dei materiali

Le tendenze applicative in ambito spazio

L'impiego della tecnologia "additiva" nell'ambito termo-meccanico delle piattaforme spaziali ha preso le mosse con l'utilizzo di processi di fusione laser di materiali metallici in polvere (tipicamente leghe di alluminio e titanio). Le prime applicazioni, molto spesso selezionate con un prudenziale approccio di sostituzione, si sono limitate a strutture di supporto di piccole dimensioni o a particolari meccanici minori, magari di forme complesse. Nonostante il limite di questo approccio si sono subito confermati i vantaggi di questa tecnologia: possibilità di soluzioni meccaniche ottimizzate (premianti il rapporto rigidezza su massa), la semplificazione del ciclo di design e documentazione, ma anche una forte sintesi in fase realizzativa, soprattutto per gli oggetti che normalmente sono assiemi di più parti.
L'AM nell'ambito delle applicazioni spazio vede oggi:

- l'ampliamento sia del ventaglio dei processi ormai maturi che dell'assorti-

mento dei materiali trattabili (con la relativa certificazione);

• il miglioramento dei parametri operativi in termini di velocità e dimensioni di stampa;

• l'aumento della flessibilità produttiva (es. macchine multi-laser) e semplificazione dell'intero processo, incluse quindi le attività la extra-stampa e le operazioni logistiche associate, in taluni casi anche automatizzate (es. macchine predisposte alla segregazione dei processi con materiali diversi);

• l'ampliamento dei processi e delle macchine pensate per la produzione contemporanea di più pezzi (produzione seriale economicamente sostenibile), basati su approcci di coalescenza di particelle (metalliche o polimeriche) legate da un micrometrico getto di collante (binder). Ottenuto un pezzo intermedio (detto "green") i pezzi finali sono quindi ricavati con passaggi termici di rimozione del binder e poi di sinterizzazione;

• la fusione tra la robotica ed alcuni processi AM (es. quelli utilizzanti le tecniche di deposizione di materiali estrusi), al fine di avere pezzi di grandi dimensioni;

• l'impiego della tecnologia AM per modelli produttivi "ibridi" in cui, attraverso specifici processi (es. Wire Arc Additive Manufacturing) vengono realizzati elementi precursori con i vantaggi della produzione additiva. Da questi elementi intermedi vengono poi realizzate le parti finite secondo tecniche tradizionali di lavorazione meccanica ma con notevole risparmio di tempi e costi;

• il quadro normativo accresciuto: per esempio nel 2021 è stata emessa la norma ESA ECSS-Q-ST-70-80C in particolare per il processo "Powder Bed Laser Fusion" (in pratica i processi SLM, DMLS ed EBM) ma utile, come linea guida, anche per l'approccio ad altri processi AM.

(A) 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 bene

ficiano dall'impiego dei polimeri "stampati-AM" in termini di massa, costi e tempi realizzativi. Le applicazioni spaziano da piccole parti meccaniche di fissaggio/supporto fino ad alcune tipologie di strutture terziarie (supporti meccanici per unità elettroniche e sensori, etc.; es Figura 5).

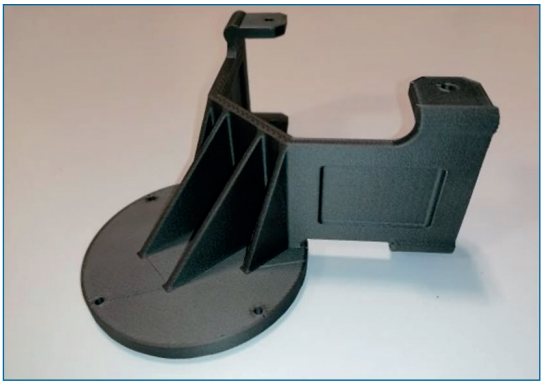


Figura 5: Supporto in Carbon-Peek per antenna GNSS (Fonte: Thales Alenia Space-Italia)

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 esempio 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, etc., 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;

(A) 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);

(B) La manifattura in situ o in orbita

La tecnologia della fabbricazione additiva è naturalmente predisposta per supportare le tematiche della nuova frontiera rappresentata dalla proiezione umana nello spazio, tramite gli aspetti del supporto logistico e della realizzazione in orbita di oggetti voluminosi.

(C) Il Supporto Logistico

Le future imprese spaziali con equipaggio a bordo per la colonizzazione della Luna richiederanno un elevato grado di autonomia in quanto i rifornimenti dalla Terra sono difficili e costosi. La possibilità di realizzare a bordo o nei siti di colonizzazione gli oggetti di cui si necessita diventa una risorsa preziosa e la stampa 3D è la risposta. Le esigenze possono scaturire da manutenzioni programmate ma anche da imprevisti per cui avendo portato nello spazio solo modiche quantità di materia prima, si combinerà la flessibilità operativa con la economicità della soluzione a fronte dei vincoli di lancio (massa, volume e costi).

(D) 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 di massa e dimensioni imposti ai "manufatti terrestri" dalla fase di lancio. Realizzare direttamente in orbita significa anche maggiore efficienza nell'utilizzo dei materiali in quanto le strutture così realizzate non debbono essere dimensionate per superare i carichi di lancio. Grosse

antenne (Figura 6) così come altre infrastrutture potrebbero essere realizzate con questo approccio.

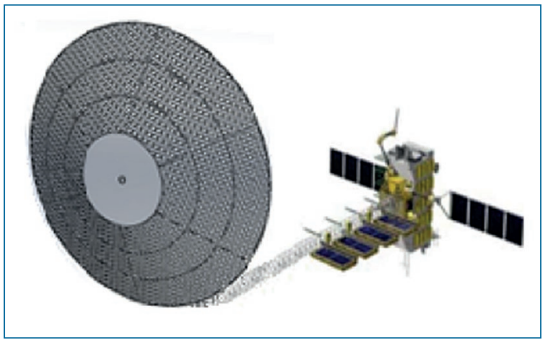


Figura 6: "Pictorial view" di una soluzione con riflettore di grandi dimensioni (Fonte: Thales Alenia Space in Italia)

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.

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 descrizione ai processi oggi più maturi e di quelli di più probabile adozione a breve, principalmente nello scopo delle 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 7) o per fascio di elettroni (EBM) di uno strato sottile di polvere metallica disposto passaggio dopo passaggio nel volume di stampa della macchina fino alla ultimazione del pezzo.

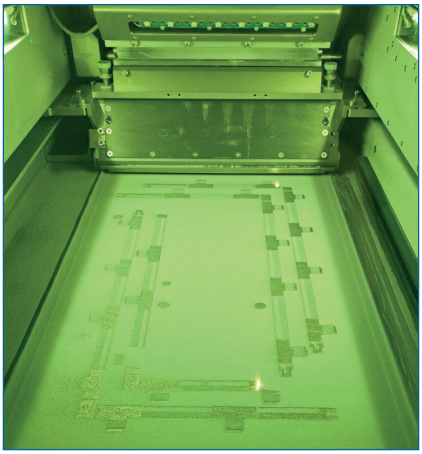


Figura 7: Immagine di fusione laser processo SLM (Fonte: AM Solutions srl)

Hanno in comune una intrinseca limitazione sulle dimensioni dei pezzi realizzabili (oggi meno avvertita con macchine sempre più grandi e multi-laser, SLM) e sulla velocità di stampa (EBM più veloce), offrono mediamente buone precisioni e capacità di dettaglio, rugosità superficiale medio-alta, basso 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, layer localmente non saldati, etc.).

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)

In questa tecnologia sia il flusso di materiale in polvere che il fascio laser sono proiettati nel punto di deposizione dove avviene istantaneamente la fusione sullo strato (materiale già depositato). Il processo è realizzato da una testa snodata che si sposta velocemente sul pezzo in creazione determinando, insieme alla intensità dei flussi di cui sopra, lo spessore e la forma del pezzo. La velocità di deposizione in termini di massa di materiale può essere anche dieci volte maggiore di quella della 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 (in particolare nell'impiego delle polveri) e si presta anche alla riparazione di difetti di stampa o per danneggiamenti superficiali 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 di deposizione a polvere (velocità di deposizione superiori ad 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. 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. 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 imprecisioni di deposizione e le distorsioni termiche intrinseche del processo.

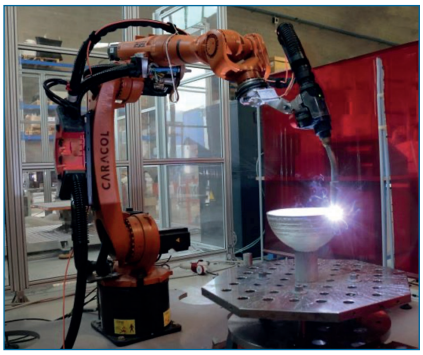


Figura 8: Robot implementante la tecnologia WAAM (Fonte: Caracol)

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. Le caratteristiche meccaniche dei pezzi così realizzati dipendono notevolmente dalla 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 geometria da realizzare. Si presta anche a stampe di grandi dimensioni (anche ben oltre il metro con l'estrusore applicato a braccio robotico). Quando declinata con materiali compatibili spazio (PEEK, Ultem 9085, PA12, etc…), può avere una

duplice applicabilità: sia per piccole parti ad elevata ricorrenza su un grande satellite che, nell'ambito dei pico-sat (classe da 1 a 10kg), per la realizzazione dell'intera struttura. Per il primo caso un esempio può venire dal supporto linee di propulsione (Figura 9), mentre per il secondo basti pensare al filone delle 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);



Figura 9: Esempio di parte minore prodotta in Carbon-Peek (Fonte: Thales Alenia Space Italia)

(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, etc…. 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 ad una sorgente laser. Da questo processo si ottiene un semi-lavorato (detto "green"), avente le fattezze del prodotto finale che viene successivamente messo in forno per la eliminazione del legante. In questo modo il pezzo aumenta la purezza del materiale base fino ad oltre il 99% ed assume quindi le proprietà chimico-fisiche e geometriche finali. Per determinati materiali parti può essere necessario un ulteriore passaggio termico ad altissima temperatura (anche sopra i 1000°C) per la sinterizzazione di polveri metalliche o ceramiche. 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 di alta complessità geometrica e la elevata finitura superficiale. Fondamentale è l'aspetto della predizione delle dimensioni finali del pezzo in quanto il de-binding incide a livello volumetrico sul materiale del pezzo. Aspetti peculiari di questa tecnica sono la possibilità usare metalli non saldabili e, non fondendo il materiale, di mantenerne inalterate le caratteristiche di base (se compatibili con la sinterizzazione), motivo per cui questa tecnologia è la migliore candidata 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, diretta o contenuti in fluidi di base. Nel primo caso il materiale, finemente ridotto, è proiettato ad altissima velocità creando così il pezzo per adesione dovuta alla deformazione plastica dell'impatto.

Invece tra le svariate forme che usano un mezzo fluido importante è la categoria 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, ad ambiti più squisitamente destinati ad applicazioni elettriche/elettroniche, con l'utilizzo di inchiostri conduttivi elettricamente o anche 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 e nelle 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.

La Frontiera dei Materiali

I materiali costituiscono il primo anello della filiera dell'Additive Manufacturing e le loro caratteristiche sono di fondamentale importanza nel conferimento dell'insieme di proprietà attese nel componente stampato. D'altro canto, la qualità e la stabilità delle loro caratteristiche chimico-fisiche sono di fondamentale importanza nell'assicurare la riproducibilità e la affidabilità costante delle produzioni in tecnologia additiva. Al tempo stesso i materiali sono anche una continua sfida sia per incontrare al meglio i processi a cui sono destinati che nel generare nuovi paradigmi realizzativi in sinergia con i processi additivi.
In questa sezione si farà quindi il punto su questo ambito di primaria importanza esaminando i filoni di maggiore interesse attuale e in prospettiva.

(A) Materiali metallici

Negli ultimi anni il mercato della produzione additiva utilizzante 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, in buona parte richiedenti nuovi materiali grezzi di base, le stampanti 3D in metallo utilizzano in larga parte polveri metalliche, e molto meno il filo metallico, le

cui materie prime provengono da leghe già esistenti. Questo fatto, insieme alla maggiore spinta applicativa delle soluzioni metalliche, ha dato una preminenza tecnologica e temporale della componente "metallica" rispetto agli altri materiali (plastici, ceramici, etc.).
La tecnologia additiva introduce nuove possibilità di processo per i materiali quasi impossibili da immaginare usando metodi convenzionali come, ad esempio, la stratificazione in un unico corpo di diversi metalli come alluminio, rame, tantalio, nichel, etc.
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. Ovviamente questi sono aspetti che vanno risolti nella messa a punto sia del processo tecnologico che anche tramite le scelte progettuali della parte da realizzare (forma in generale e dei dettagli, spessori, finitura superficiale, etc.), più o meno sensibili alla scelta del metallo scelto e dei parametri di stampa.
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, varie leghe di alluminio, due leghe di titanio, inconel e nichel. Più di nicchia e comunque crescenti anche rame, cobalto, metalli preziosi (oro, argento, platino), tantalio e tungsteno. I principali materiali utilizzati per le applicazioni aerospaziali sono le leghe di alluminio, quelle di titanio e vari tipi di acciai. Tuttavia, la tecnologia della "produzione additiva" ha aperto nuove frontiere nel settore dei materiali che vengono progettati specificatamente per la stampa: gli obiettivi sono sia quello di migliorare i classici parametri di rigidezza, resistenza, durezza, resistenza a fatica, basso CTE, etc. ma anche quello di garantire sia una buona "laserabilità", al fine di ridurre il rischio di difetto nei pezzi. Inoltre, si stanno esplorando i nuovi fronti del "drogaggio" dei materiali base per avere prestazioni ottime su determinati parametri, per la funzione del pezzo da realizzare.

(A1) Produzione additiva con titanio

Il titanio è uno dei materiali più popolari per la stampa 3D di parti bio-compatibili motivo per cui è molto usato per le protesi ossee. Per via delle migliori prestazioni meccaniche specifiche rispetto l'alluminio ha una sua area applicativa anche in campo aerospaziale, dove il suo maggior costo è meglio tollerato, anche a fronte del minor spreco di materiale rispetto la tecnologia di 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.

(A2) 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 la AlSi7Mg e la AlSi10Mg anche se molte altre leghe con prestazioni meccaniche superiori (tipo Scalmalloy, Elementum 3D e Almascan ®) sono ormai stabilmente impiegate.

(A3) 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. Ci sono stati anche diversi studi che indicano la fattibilità dell'utilizzo di acciaio inossidabile 316L per produrre serbatoi a pressione nucleare realizzati mediante produzione additiva.

Uno studio sviluppato da Renishaw indica che il processo AM possa fornire 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.

(A4) 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 e le cui prestazioni sono comparabili con i prodotti di fonderia di altissima qualità.

(B) 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, essendo settori in un certo senso contigui.
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:

(B1) 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.

(B2) Stampa 3D con nylon

Il nylon, conosciuto genericamente come poliammide, è un polimero sintetico che offre più resistenza dell'ABS ad un costo però 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.

(B3) 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.

SOCI AIRI >

SOCI SOSTENITORI

BRACCO
CNR - CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE
MAPEI
PIRELLI

ORGANIZZAZIONI DI IMPRESE

FARMINDUSTRIA
FEDERCHIMICA
UNIONCAMERE

ISTITUTI FINANZIARI

INTESA SANPAOLO

ENTI PUBBLICI DI RICERCA E UNIVERSITÀ

AREA SCIENCE PARK
CENTRO NAST
CSGI
ENEA
INAIL
POLITECNICO DI TORINO - CHILAB
SCUOLA NORMALE SUPERIORE DI PISA
UNIVERSITÀ DI PISA

INDUSTRIE E CENTRI DI RICERCA

BAIC AGRO ITALIA
BIOTECNOMED
BYRON'S HOLDING
BRACCO IMAGING
BREMBO
CAMOZZI AUTOMATION
CENTRO RICERCHE FIAT
CEREAL DOCKS
CERTIMAC
CONSORZIO ITALBIOTEC
CRSLAGHI
CETMA
CIRA
COLOROBBIA CONSULTING
COMSOL
DIASORIN
DOMPÉ
ECOR INTERNATIONAL
ELETTRA SINCROTRONE TRIESTE
E.M.A
ERICSSON TELECOMUNICAZIONI
FINCANTIERI
FONDAZIONE CAVALIERI OTTOLENGHI
FONDAZIONE BRUNO KESSLER
FONDAZIONE PIEMONTE INNOVA
GEWISS
GIUSTO FARAVELLI
INNOVHUB STAZIONI SPERIMENTALI PER L'INDUSTRIA
IVECO
LFOUNDRY
MECCANO
MEMC ELECTRONIC MATERIALS - GLOBALWAFERS COMPANY

**Situazione soci aggiornata a dicembre 2024*

MENARINI SILICON BIOSYSTEMS
METTLER TOLEDO
PIRELLI TYRE
PROGEST
SAES GETTERS
SAIPEM
SMILAB
SPEA
STMICROELECTRONICS
TECNOALIMENTI SOCIETA CONSORTILE PER AZIONI
THALES ALENIA SPACE ITALIA
TODARO INDUSTRY
TXT E-TECH

START UP INNOVATIVE

AIENG
ARCHA SRL
ASSING
COSBERG
ECOR INTERNATIONAL
ENERTECH SOLUTION
EPSILON
IUVO
JONIX
KLASTER
MARITIME TECHNOLOGY CLUSTER FVG
NATIVE TO WEAR
NEXT TECHNOLOGY TECNOTESSILE SRL
NICHE SRL
NVNOVA
PLASTICA ALFA
SULTAN
TECHNETIC ITALIA

SOCIETÀ DI CONSULENZA

AYMING ITALIA
BUGNION
FI GROUP ITALIA
FINSERVICE
LUNATI & MAZZONI
SERVICE GROUP R&D
STUDIO PROMOZIONI
STUDIO TRIBUTARIO E SOCIETARIO DELOITTE
TINEXTA INNOVATION HUB

Airi promuove la ricerca industriale e l'innovazione tecnologica in Italia e in Europa.
Previsioni tecnologiche, policy, networking e tecnologie emergenti.

Scopri di più su www.airi.it

Airi
ASSOCIAZIONE ITALIANA PER LA RICERCA INDUSTRIALE
1974 2024





















Isbn 978-88-98935-75-8