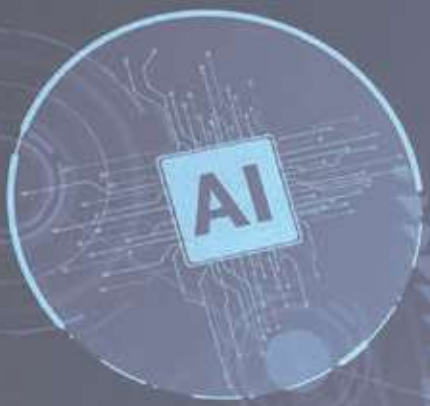




Ricerca Tecnologica e Innovazione 2025

**MINISTERO DELLA DIFESA
DIREZIONE NAZIONALE DEGLI ARMAMENTI**



INDICE

INDICE

Presentazione del Direttore Nazionale degli Armamenti	Pag.	4
Prefazione del Direttore III Reparto	Pag.	6
Uno sguardo all'Organizzazione	Pag.	9
La Ricerca in ambito Nazionale	Pag.	17
La Ricerca in ambito Internazionale	Pag.	101
Riassunto statistico - finanziario	Pag.	115
Sigle e acronimi	Pag.	121

PRESENTAZIONE

DEL DIRETTORE NAZIONALE DEGLI ARMAMENTI

Il volume Ricerca Tecnologica e Innovazione 2025 raccoglie e valorizza i principali risultati dei progetti di ricerca militare conclusi nel corso dell'anno 2024, cofinanziati dalla Direzione Nazionale degli Armamenti. Si tratta di iniziative sviluppate nell'ambito delle competenze attribuite *ex-lege* in materia di innovazione tecnologica per la Difesa, con l'obiettivo di ricercare soluzioni tecnologiche avanzate, rafforzare la superiorità operativa dello strumento militare nazionale e garantire la sovranità tecnologica del nostro Paese. L'innovazione tecnologica rappresenta, oggi più che mai, un elemento imprescindibile per assicurare l'efficacia e la resilienza delle capacità militari. L'evoluzione accelerata di ambiti tecnologici come l'intelligenza artificiale, le tecnologie quantistiche, i sistemi ipersonici, le tecnologie spaziali, i sistemi remotizzati e autonomi, le biotecnologie *etc.*, solo per fare alcuni esempi, genera nuove opportunità operative, ma al contempo impone sfide cruciali: ciò che può offrire un vantaggio competitivo decisivo alla Difesa può trasformarsi in una minaccia se impiegato da attori ostili o non statuali.

Il conflitto tra RUSSIA e UCRAINA ha evidenziato con forza come i teatri di guerra contemporanei siano profondamente mutati: insieme ai classici fattori del confronto convenzionale, emergono con sempre maggiore rilevanza le tecnologie *dual use*, quali i droni, le comunicazioni satellitari civili e le reti digitali adattate per scopi militari. In questo contesto, la rapidità di adattamento e la capacità di anticipare i cambiamenti tecnologici diventano fattori determinanti per la sicurezza nazionale e collettiva.

Per affrontare queste sfide è indispensabile disporre di una solida base industriale e di ricerca nazionale. Solo attraverso un'autonomia tecnologica concreta è possibile garantire alla Difesa l'accesso e l'impiego continuativo di sistemi, piatta-



forme ed equipaggiamenti senza condizionamenti esterni, sia in termini temporali che geografici.

La Difesa italiana è fortemente impegnata nel promuovere e sostenere l'innovazione, riconoscendo il ruolo centrale delle eccellenze del mondo industriale, comprese le *start-up*, accademico e dei centri di ricerca. In quest'ottica, il Piano Nazionale della Ricerca Militare costituisce lo strumento principale di *open innovation* volto a creare connessioni virtuose tra la Difesa e l'ecosistema nazionale della ricerca e dell'innovazione, favorendo sinergie, co-sviluppi e contaminazioni tecnologiche.

Un ulteriore asset strategico è rappresentato dalla partecipazione attiva alle iniziative di cooperazione internazionale, in particolare nell'ambito della NATO – attraverso la *Science and Technology Organization* (STO) e l'acceleratore NATO *Defence Innovation Accelerator for the North Atlantic* (DIANA) – nonché all'interno dell'Agenzia Europea per la Difesa (*European Defence Agency* -

EDA). Tali contesti multilaterali sono fondamentali per rafforzare la dimensione collaborativa della ricerca, mantenere un alto livello tecnologico condiviso e valorizzare il contributo dell'ITALIA nel panorama della sicurezza euro-atlantica.

Investire nella ricerca militare significa, in ultima analisi, investire nel futuro del Paese. Le ricadute economiche, industriali e sociali generate da tali attività vanno ben oltre il settore della Difesa, ali-

mentando l'innovazione nazionale, favorendo la crescita occupazionale ad alta specializzazione e contribuendo a costruire una società più sicura, resiliente e tecnologicamente avanzata.

Il Direttore Nazionale degli Armamenti
Ammiraglio di Squadra
Giacinto OTTAVIANI

PREFAZIONE

A CURA DEL DIRETTORE DEL III REPARTO - INNOVAZIONE TECNOLOGICA

Nel campo della pianificazione militare, il tempo è la risorsa più importante da valutare, perché ha una caratteristica unica: non è rigenerabile.

Si possono riparare i mezzi, rifornire gli alimenti, le uniformi, gli equipaggiamenti, le munizioni e perfino sostituire le persone ma il tempo no, *tempus fugit*, e la *recherche du temps perdu* è solo l'oggetto di un romanzo, neppure di fantascienza, il cui protagonista alla fine deve arrendersi all'inevitabilità dell'incedere degli anni e dei cambiamenti che ciò comporta.

In sostanza il tempo possiamo inseguirlo ma non superarlo e la vera sfida è tenerne il passo, sfruttandolo al meglio per innovare i processi e le tecnologie, senza mai abbandonarsi alle dinamiche non sempre favorevoli del cambiamento ma sforzandosi di gestirle e provando anzi ad anticiparle grazie alla nostra *vision*. Chi riesce a pilotare e auspicabilmente a prevedere *tempestivamente* i flussi del cambiamento acquisisce un vantaggio competitivo decisivo, che in ambito civile si misura in termini di sta-

bilità e sviluppo economico, in ambito militare in termini di deterrenza e capacità di fare fronte alle minacce.

Lo strumento fondamentale per corrispondere efficacemente alle mutevoli esigenze dettate dal tempo è la ricerca, presupposto irrinunciabile dell'innovazione.

Il tempo può quindi diventare il migliore alleato delle nostre Forze armate se dedichiamo la necessaria attenzione e gli opportuni finanziamenti alla ricerca militare, secondo uno schema iterativo circolare che non si accontenti mai dei risultati raggiunti ma da quelli riparta per andare oltre. Gli effetti di tali investimenti peraltro appartengono in realtà a tutti, in quanto non mancano mai di riverberarsi positivamente nel mondo civile.

Le attività di ricerca, se condotte responsabilmente e correttamente, oltre ad arricchire il patrimonio culturale dell'umanità, generano ricadute concrete sulla società che si traducono comunque in un fattore irrinunciabile di progresso.

Dirigente Generale
Dott.ssa Giovanna ROMEO





UNO SGUARDO ALL'ORGANIZZAZIONE



STRUTTURA ORGANIZZATIVA



La Direzione Nazionale degli Armamenti (DNA), attraverso l'azione del III Reparto "Innovazione Tecnologica", individua, promuove e avvia, nell'ambito nazionale e della cooperazione internazionale, progetti e programmi di ricerca tecnologica (R/T) per la Difesa, la c.d. "ricerca militare".

Questo avviene grazie alle attività e competenze delle unità organizzative che compongono il suddetto Reparto, schematicamente rappresentato nella sovrastante figura, tra le quali - in particolare - il 1° Ufficio, che, a vario titolo, si occupa di ricerca, sperimentazione e test e delle relative strategie di pianificazione.

Tale attività di ricerca comprende una serie di iniziative, prioritariamente allineate con i criteri e le indicazioni dello Stato Maggiore della Difesa (SMD), che identifica le aree di primario interesse tecnico-capacitivo (i cosiddetti *cluster*) verso cui orientare la stessa. Tra queste iniziative troviamo:

- il **Piano Nazionale della Ricerca Militare (PNRM)**, rivolto a industrie, piccole e medie imprese, *startup*, università ed enti di ricerca nazionali, pubblici e privati, con l'obiettivo di mantenere e potenziare i livelli di eccellenza nazionale in specifici settori tecnologici di interesse per la Difesa.
- i **Progetti di ricerca tecnologica svolti presso i Centri di test della Difesa**, che mirano a orientare e rafforzare le capacità della Difesa nel settore del *Test and Evaluation* (T&E).
- gli **Accordi Quadro con Università ed Enti di ricerca**, finalizzati a incrementare il patrimonio di conoscenze scientifiche e tecnologiche della Difesa.
- i **Programmi internazionali**, sviluppati prevalentemente in ambito UE (EDA - *European Defence Agency* ed EDF - *European Defence Fund*), NATO (STO - *Science & Technology Organization*, DIANA - *Defence Innovation Accelerator for The North Atlantic*, NIF - *Nato Innovation Fund*) e bi/-multilaterali.

L'ORGANIZZAZIONE INTERNA

Strumento altrettanto imprescindibile per l'individuazione degli obiettivi, la gestione e lo sfruttamento della conoscenza è l'organizzazione interna della Difesa afferente alla ricerca tecnologica, che può anch'essa essere schematizzata secondo tre cardini organizzativi:

- lo Stato Maggiore della Difesa e quelli delle Forze Armate (FF.AA.), orientati a individuare gli obiettivi della ricerca tecnologica e a sfrut-

tare i risultati, nell'ottica delle prospettive di sviluppo capacitivo;

- le Direzioni Tecniche (DD.TT.) e Generali (DD.GG.), indispensabili per la competenza tecnica e gestione dei progetti;
- i Centri di Test delle FF.AA., banco di prova ideale per la validazione e valorizzazione sperimentale degli esiti finali dell'attività di ricerca, spesso consistenti in dimostratori tecnologici.



OBIETTIVI STRATEGICI

Secondo l'Atto di indirizzo del Ministro della Difesa, l'ammodernamento dello strumento militare richiede il sostegno e l'armonizzazione della ricerca tecnologica che dovrebbe essere orientata al conseguimento degli obiettivi di sviluppo capacitivo delle Forze Armate, coinvolgendo in modo sinergico tutti gli Enti della Difesa che si occupano di ricerca, sperimentazione e test, sia in ambito di sviluppo che operativo.

I discendenti obiettivi strategici dei programmi di ricerca scientifica e tecnologica per la Difesa sono incentrati su diverse aree di intervento, volte a individuare e tutelare le tecnologie considerate di "valenza strategica" al fine di garantire la sovranità tecnologica nazionale e garantire il sostegno ai progetti nazionali o di interesse nazionale all'interno dei programmi di cooperazione dell'Unione Europea. Ciò viene realizzato in collaborazione con il settore industriale della difesa, al fine di mantenere e sviluppare il "know-how" tecnologico specifico del settore e implica la collaborazione con partner nazionali e internazionali nel settore industriale e la ricerca di sinergie con centri di ricerca e università.

Per raggiungere tali obiettivi, la strategia della Direzione Nazionale degli Armamenti, attraverso il III Reparto "Innovazione Tecnologica", si basa su approcci *capability-pull* e *technology-push* e prevede azioni di coordinamento e collaborazione tra diverse organizzazioni, come Ministeri, Centri di ricerca, industria e enti scientifici, mirando a creare una rete di relazioni sinergiche per la ricerca tecnologica, in collaborazione con organizzazioni governative, scientifiche e industriali.

Le conseguenti attività di ricerca tecnologica per la Difesa comprendono diversi ambiti, come il Piano Nazionale della Ricerca Militare (PNRM), i progetti di ricerca e sviluppo tecnologico condotti presso i Centri di test della Difesa, gli Accordi Quadro con università e enti di ricerca, nonché i programmi internazionali sviluppati in ambito UE, NATO e bilaterale.

I settori di interesse prioritario per la ricerca tecnologica militare, in piena coerenza con le esigenze capacitive della Difesa, includono:

- **C2 e Multi-Domain Situational Awareness:** sviluppo di soluzioni in grado di ricevere, combinare e rappresentare in modo integrato dati provenienti da sensori e sistemi militari e civili appartenenti ai cinque domini operativi (terrestre, marittimo, aereo, cibernetico e spaziale), inclusi gli ambienti informativo ed elettromagnetico ed assicurare la capacità di pianificare e condurre le operazioni multidominio.
- **Tecnologie spaziali:** sviluppo sensori/assetti per la *Detection, Mitigation* e *Protection* da nuove minacce nello specifico dominio (Ipersonico, Sistemi Anti-Satellite - ASAT, *Space based Early Warning Missile*); *Military Satellite Communications* – MILSATCOM (incluso lo sviluppo di forme d'onda di comunicazione a banda stretta innovative per operazioni in scenari EM complessi), Osservazione della Terra, Accesso allo Spazio, *Responsive Space Capabilities, Space Domain Awareness (SDA), In-Orbit Servicing*, Sorveglianza spettro elettromagnetico, piattaforme stratosferiche.
- **Tecnologie cyber:** soluzioni per il conseguimento della consapevolezza situazionale nel *cyberspace*, per il monitoraggio e per la difesa dei sistemi *Information Technology (IT)* e *Operational Technology (OT)* nel campo di battaglia / infrastrutture critiche sul territorio nazionale, nonché di attacco nel dominio cibernetico. Soluzioni tecnologiche per il contrasto alle attività di *influence* e di disinformazione nel *cyberspace*. Soluzioni tecnologiche che consentano, attraverso lo sfruttamento dello spettro elettromagnetico, di generare effetti nel *cyberspace* (*Cyber Electro-Magnetic Activities - CEMA*).
- **Underwater:** tecnologie per il controllo della dimensione subacquea, per la sorveglianza e la protezione delle infrastrutture critiche (settori energetico e comunicazioni), e per l'efficacia operativa dei mezzi e dispositivi che vi operano.

- **Urban warfare:** tecnologie per la mappatura, il controllo e lo sfruttamento delle caratteristiche del territorio urbano e del relativo sottosuolo e per l'efficacia operativa dei mezzi e dispositivi militari che vi operano (inclusi Sistemi Unmanned).
 - **Cognitive warfare:** tecnologie e metodologie per la mitigazione e lo sfruttamento di strumenti inerenti l'influenza, l'interferenza o l'alterazione atti a incrementare o degradare le capacità della mente umana.
 - **Intelligenza Artificiale:** soluzioni supportate dall'utilizzo di modelli di Intelligenza Artificiale in tutte le sue forme (statistiche, logiche e semantiche), anche *multi-agent*.
 - **Tecnologie quantistiche:** soluzioni basate sul *Quantum Sensing* (contemplando in esso anche il *Quantum Position, Navigation and Timing* - PNT), *Quantum Communication* e *Quantum Computing (Information Science)*.
 - **Sistemi Autonomi:** tecnologie per lo sviluppo e il contrasto dei *Robotic Autonomous Systems* (RAS), *Unmanned Systems* (UxV) in tutti i Domini Operativi.
 - **Sviluppo sistemi complessi di nuova generazione:** sviluppo di armi ad energia diretta (Laser ed *ElectroMagnetic Pulse* - EMP) e di sistemi di difesa dalle stesse.
 - **Potenziamento capacità operative del soldato:** incremento capacità di difesa e offesa (armamento individuale caratterizzato da maggiore letalità e capacità di ingaggio, esoscheletri, equipaggiamento protettivo innovativo e sempre più performante), incremento autonomia energetica per alimentazione equipaggiamento e dotazioni C2, *human enhancement*, soluzioni avanzate di *awareness*, prevenzione, rilevazione e contrasto della minaccia CBRN, sviluppo Biosensori e applicazioni di Bioelettronica per la monitorizzazione dei parametri vitali e delle condizioni di stress dei combattenti, riduzione degli effetti negativi delle infermità.
 - **Nano tecnologie, Novel materials and manufacturing:** sviluppo di materiali altamente performanti, resistenti ad altissime temperature e *stress* elevati.
 - **Tecnologie Ipersoniche:** sviluppo di soluzioni relative a materiali, sistemi di propulsione, sistemi di guida, teste in guerra, simulazione profili di volo delle minacce (al fine di individuarne i limiti), sensoristica (spaziale/aerospaziale, terrestre e navale) e attuatori innovativi (o implementazione di soluzioni innovative atte a incrementare le performance degli attuatori esistenti).
 - **Adattamento agli effetti del *Climate Change* – Sostenibilità ambientale, sicurezza e resilienza energetica, efficientamento del parco infrastrutturale, adeguamento mezzi, sistemi ed equipaggiamenti:** soluzioni per la riduzione del *footprint* logistico, ambientale, sicurezza ed efficientamento energetico delle infrastrutture e dei mezzi militari.
 - **Reti di comunicazione di nuova generazione:** soluzioni supportate dall'utilizzo delle tecnologie 5G (inclusa la loro integrazione con le NTN - *Non Terrestrial Network*) e 6G.
- Questi settori, che rappresentano le aree di interesse strategico per la ricerca tecnologica militare e l'ammmodernamento delle capacità della Difesa, si allineano con gli aggregati capacitivo-tecnologici prioritari identificati annualmente con lo Stato Maggiore della Difesa. L'individuazione di tali settori consente una programmazione e gestione più efficace ed efficiente delle risorse finanziarie, riducendo la frammentazione delle attività di ricerca tecnologica e la dispersione delle risorse su molteplici e diverse iniziative.
- Detto approccio, che rappresenta per la Direzione Nazionale degli Armamenti un indirizzo strategico e organizzativo da perseguire costantemente, sarà d'ausilio alla costruzione di un nuovo condiviso *mindset* dell'A.D. per l'Innovazione, volto alla continua promozione di un'organizzazione militare e civile integrata, efficiente incubatrice di nuove idee e concetti tecnici per la Difesa.





LA RICERCA IN AMBITO NAZIONALE



INTRODUZIONE

Nell'alveo dei programmi di ricerca condotti dalla Direzione Nazionale degli Armamenti nel corso del 2024, sono di seguito presentati i risultati di alcuni progetti, in quanto ritenuti

esemplificativi delle attività tecnico - scientifiche, in corso di esecuzione o terminati, di rilevanza tecnologica per il comparto Difesa e sicurezza:

- *Innovativa Unità Propulsiva Diesel 2 Cilindri Ibrida* (**2CHDP**)
- Sviluppo di un sistema Radar Multibanda coerente e distribuito su una flotta di Droni (**DISTIBUTED-DRONE**)
- Studio per Mobile *Multistatic Radar Network* (**MoMuRaN**)
- Sperimentazione di un Radio Distributore Cognitivo di quinta generazione (**RADIC-5G**)
- Sensori su sistemi mobili e remoti Terahertz (**STORM**)
- Sviluppo di metodologie di ATR basate su reti convoluzionali neurali CNN (**PACMAN**)
- Progettazione, realizzazione e sperimentazione di una piattaforma robotica biomimetica sottomarina (**PERSICO**)
- *Self-Attentive Function Embeddings for embedded Systems* (**SAFE**)
- Progettazione concettuale della nave porta droni (**SCIAMANO**)
- *Wearable Assistant for VEterans in sport* (**WAVE**)
- Sintesi, Produzione dell'Ebselen e sua Sperimentazione (**SPES**)
- Genotossicità delle radiazioni elettromagnetiche nelle applicazioni militari (**GREAM3**)
- Analisi Genomica Resistoma Infezioni Nosocomiali dei Teatri Operativi (**AGRINTO**)
- Sviluppo di un dimostratore del sistema di estrazione di un lanciatore da nave (**SIMONA**)

Il progetto di ricerca di Oral Engineering, denominato PNRM “2CHDP Progetto e Sviluppo di una innovativa unità propulsiva Diesel 2 cilindri ibrida”, mira a sviluppare una soluzione tecnologica per la motorizzazione ibrida di veicoli militari leggeri.

L’attività prevede la progettazione, costruzione e sviluppo di un innovativo *powertrain* ibrido (diesel + elettrico) composto da un motore termico a 2 cilindri con doppia iniezione e alta densità di potenza, abbinato ad un motore elettrico a flusso assiale con elevato rapporto peso/potenza.

Il gruppo moto-generatore può essere utilizzato anche come gruppo elettrogeno o propulsivo per imbarcazioni. I possibili scenari di utilizzo su un veicolo includono modalità *silent* (solo elettrica) per missioni operative o ricognitive, con autonomia dipendente dalla capacità della batteria, potenza di 170 CV, silenziosità, bassa tracciabilità termica e zero emissioni. Modalità termica, con potenza di 235 CV e autonomia dipendente dalla capacità del serbatoio carburante; modalità ibrida con potenza totale di 380 CV; utilizzo come *Range Extender* per ricaricare le batterie di trazione del veicolo; utilizzo come gruppo elettrogeno APU per produrre energia elettrica in un campo base, alimentando tutti gli apparati elettrici/elettronici.

Questo progetto rappresenta un passo avanti significativo nella tecnologia dei veicoli militari leggeri, offrendo soluzioni versatili e ad alte prestazioni per diverse esigenze operative.

INTRODUZIONE

Negli ultimi anni, i motori diesel utilizzati sui mezzi militari si sono distinti da quelli impiegati per il trasporto merci per la necessità di maggiore potenza e coppia. Inoltre, vi è una crescente esigenza di veicoli con propulsione ibrida, mantenendo però contenuti i pesi e le dimensioni dell’unità propulsiva.

Il progetto di ricerca di Oral Engineering mira a fornire una soluzione tecnologica e operativa per la motorizzazione ibrida di veicoli militari leggeri, caratterizzata da un’elevata densità di potenza, cilindrata ridotta, pesi contenuti e bassi consumi.

Il gruppo ibrido progettato da Oral Engineering è composto da un’unità termica bicilindrica con una cilindrata totale di 2600 c.c., che sviluppa una potenza massima di 173 kW (235 CV), e un’unità elettrica da 125 kW (170 CV). Il sistema di iniezione *common rail*, con doppio iniettore per cilindro (brevetto Oral), è abbinato a una centrali-

na di controllo motore (ECU) sviluppata da Oral in collaborazione con un’azienda italiana. Il brevetto della doppia iniezione consentirà in futuro di esplorare l’utilizzo di diverse tipologie di combustibili *green*, come gasolio e benzina, gasolio e idrogeno, ed *e-fuels*.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

Negli ultimi anni, gli scenari operativi hanno evidenziato la necessità di veicoli ibridi con alta densità di potenza e capacità di movimento in modalità silenziosa. Il progetto PNRM 2CHDP anticipa questa tendenza, basandosi sulla progettazione di un motore Diesel bicilindrico abbinato ad un motore elettrico a flusso assiale, adatto ad una vasta gamma di applicazioni.

L’esperienza di Oral Engineering nella progettazione di motori, insieme alle preziose informa-

zioni fornite dagli operatori delle Forze Armate, ha permesso di definire con precisione le caratteristiche ottimali del gruppo ibrido, ideale per veicoli leggeri e medi.

METODOLOGIA

La metodologia del progetto si è focalizzata sull'analisi dei propulsori impiegati nei veicoli militari "Light and Medium Duty" e sulla valutazione di tecnologie ibride e *multi-fuel* (gasolio, idrogeno, GPL, biocarburanti, *e-fuels*) applicabili nel medio termine nei settori civile e militare. Un elemento chiave è il sistema di iniezione *common rail* a doppio iniettore per cilindro, brevettato da Oral, che ottimizza tali applicazioni.

L'approccio strategico ha trasferito il *know-how automotive* sui *powertrain* ibridi di ultima generazione ai propulsori militari, integrando metodologie di gestione e controllo delle due unità. Il fulcro tecnologico è l'accoppiamento di un motore/generatore elettrico ad alto rapporto peso/potenza con un'unità a combustione interna di nuova concezione, alimentata a gasolio. Questo *layout* unisce i benefici dell'elettrico (silenziosità, bassa

tracciabilità termica, zero emissioni) a quelli del motore a gasolio avanzato.

Il progetto, strutturato in tre fasi da 12 mesi ciascuna, ha previsto:

Fase 1.0 (2021): Sviluppo del *concept*, analisi tecnologica e brevettuale, dimensionamento preliminare delle unità termica ed elettrica, progettazione 3D del motore termico, calcoli di combustione e analisi CFD/FEM delle componenti principali (testata, pistone, albero motore, basamento) (Figure 1, 2, 3, 4, 5, 6).

Fase 2.0 (2023): Simulazione e sviluppo del controllo elettronico tramite il sistema *common rail* Oral, progettazione del *software* di gestione dell'iniezione, costruzione delle centraline (ECU), dimensionamento del gruppo di sovralimentazione e realizzazione dei dimostratori tecnologici (DTA) (Figura 7).

Fase 3.0 (2025): Assemblaggio dei DTA, calibrazione al banco prova con acquisizione dati, test di durata e definizione delle curve di potenza finali.

Questo approccio garantisce un'integrazione efficace di tecnologie innovative per propulsori militari avanzati, con applicazioni trasversali al settore civile.

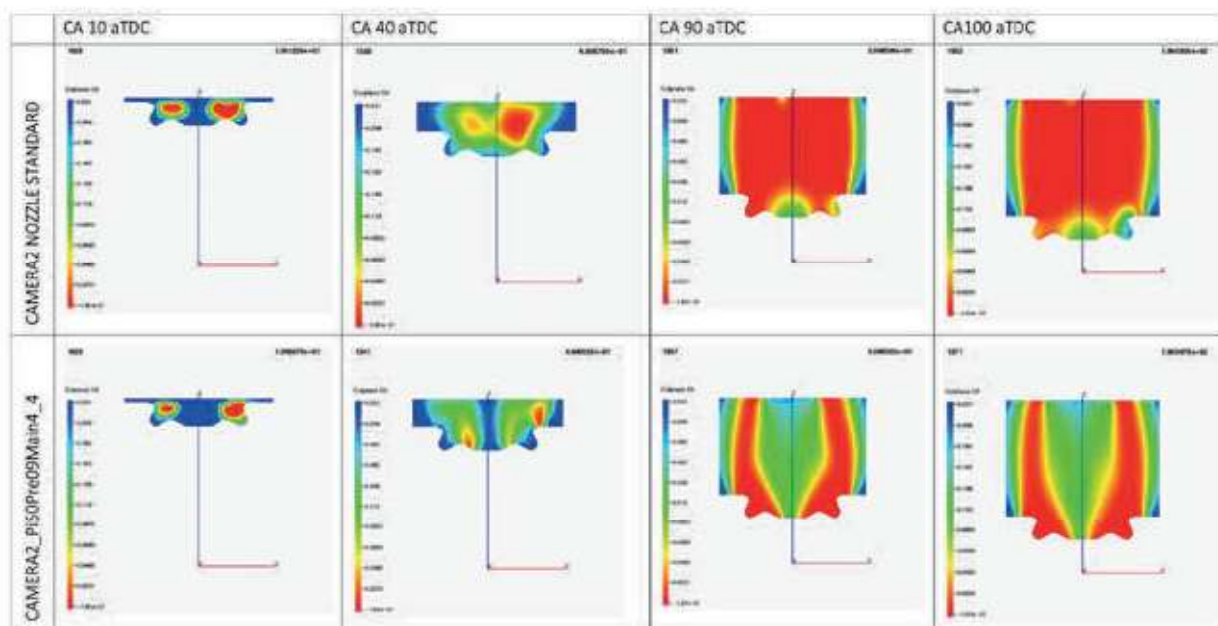


Figura 1 - Analisi CFD della combustione.

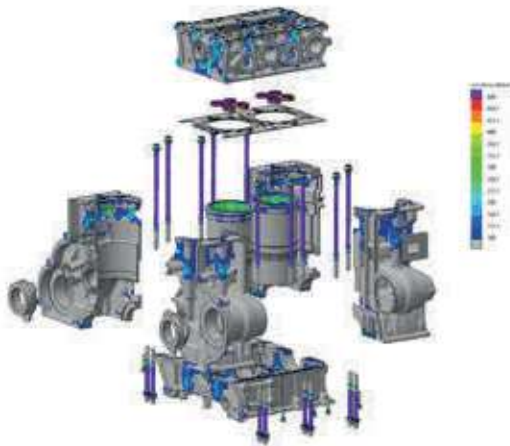


Figura 2 - Calcoli strutturali FEM.

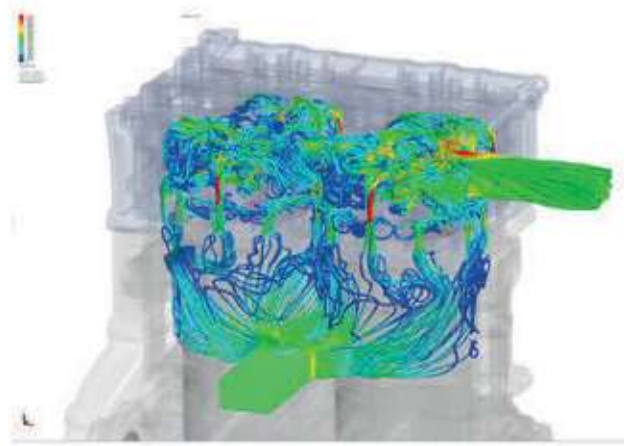


Figura 3 - Analisi CFD del circuito di raffreddamento.



Figura 4 - Dimensioni complessive del gruppo ibrido 2CHDP.

Common-rail system CRS2-25

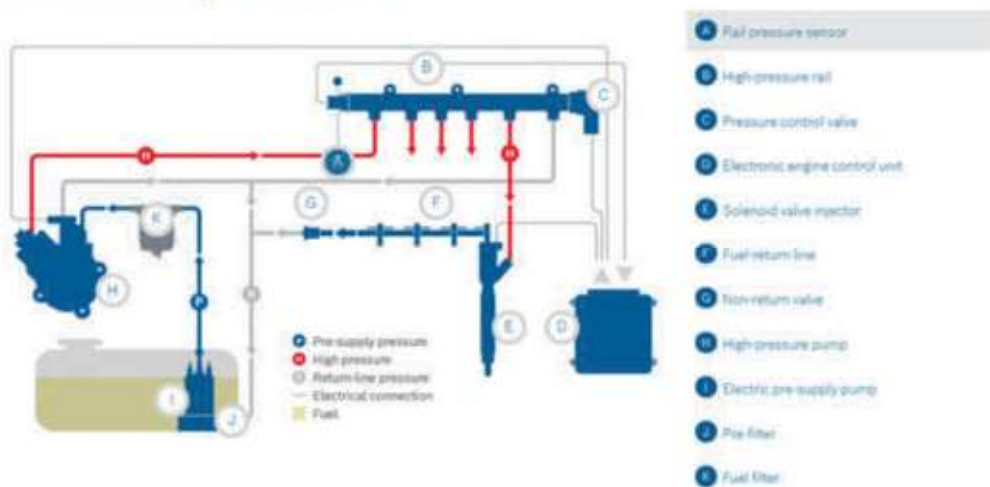


Figura 5 - Circuito di iniezione *common-rail* con doppio iniettore per cilindro.

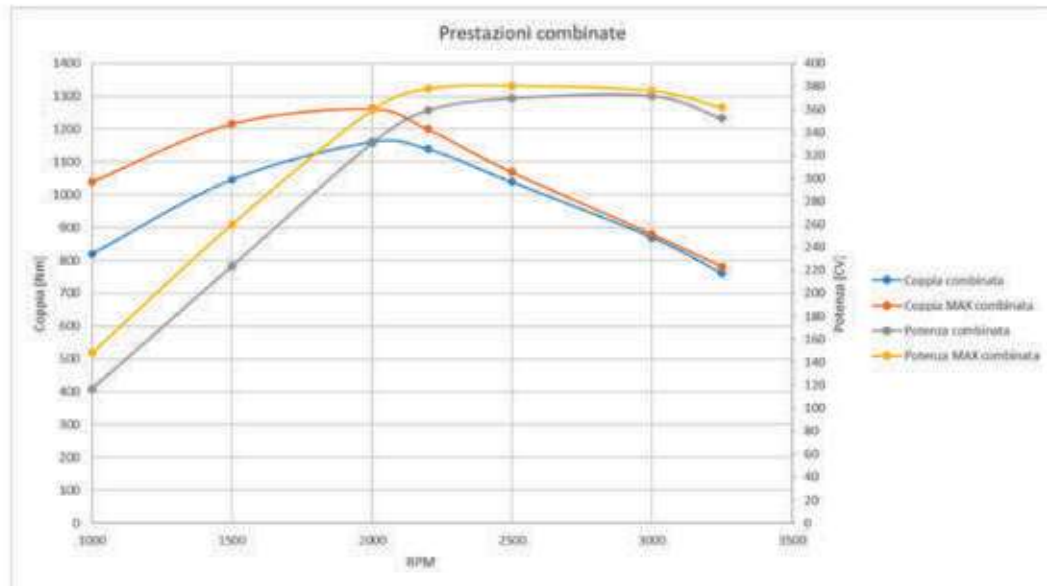


Figura 6 - Prestazioni combinate del gruppo ibrido 2CHDP.



Figura 7 - Motore assemblato pronto per sala prova.

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

Al termine della FASE 3.0, il gruppo ibrido sarà pronto per essere installato su un veicolo per i

test su strada. In collaborazione con AD, Oral contatterà un costruttore nazionale per valutare la possibilità di allestire un veicolo sperimentale ibrido da testare su un circuito di prova specifico. Gli ingombri del nuovo motore termico bicilindrico, insieme al gruppo elettrico, sono comparabili con quelli degli attuali motori termici a quattro cilindri utilizzati su questa tipologia di veicoli. Inoltre, il gruppo ibrido potrà essere immediatamente utilizzato come gruppo elettrogeno (APU), in grado di fornire potenze di circa 120 kW, con pesi e ingombri inferiori del 50% rispetto agli attuali gruppi in produzione.

CONCLUSIONI

La tecnologia introdotta nel progetto del gruppo ibrido (motore termico + elettrico), si inquadra in un'ottica più ampia della progettazione di una singola unità propulsiva bicilindrica, ma si pone come obiettivo la realizzazione di un'intera famiglia di unità moto-propulsive, che secondo una logica modulare, possa coprire le esigenze di un'ampia gamma di veicoli (*Light, Medium ed Heavy Duty*), tale da garantire un'elevata intercambiabilità di componenti e tale da facilitare le operazioni logistiche e di manutenzione.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

AD	<i>Amministrazione Difesa</i>
APU	<i>Auxiliary Power Unit</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
DTA	<i>Dimostratore Tecnico Avanzato</i>
FEM	<i>Finite Elements Method</i>
PNRM	<i>Piano Nazionale Ricerca Militare</i>

PAROLE CHIAVE

Twin-Cylinder, Hybrid, Diesel, Powertrain.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	a2018.153
Amministrazione appaltante:	Direzione Armamenti Terrestri
Ente responsabile del progetto:	Oral Engineering S.r.l.
Città, Regione:	Baggiovara (Mo), Emilia Romagna
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Sig. Franco Antoniazzi
Recapiti del responsabile del progetto:	Via Decorati al Valor Militare, 40, Baggiovara (MO)
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	+39 059 512121
E-mail del responsabile del progetto:	f.antoniazzi@oralengineering.com

BIBLIOGRAFIA

Articoli di rivista

M. Feola, P. Pelloni, G. Cantore, G. Bella, P. Casoli, G. Toderi, Optimization of injection law for direct injection Diesel engine, Journal of engineering for gas turbines and power, ASME 0692.

Libri e altre monografie

Giancarlo Ferrari, Motori a combustione interna, Società Editrice Esculapio, Prima ed. Settembre 2016.
Antonio Strozzi, Costruzione di macchine, Pitagora Editrice Bologna.

DISTRIBUTED-DRONE

Lo scopo del progetto è sviluppare un sistema radar multistatico multibanda operante su una flotta di droni che implementi la fusione coerente dei segnali, consentendo una più elevata risoluzione rispetto a sistemi radar non coerenti. La novità consiste nell'utilizzo della fotonica come tecnologia abilitante, che permette di distribuire segnali coerenti alle periferiche senza complesse sincronizzazioni. L'obiettivo finale è realizzare un dimostratore in scala ridotta utilizzando dove necessario circuiti fotonici integrati. La Fase 1 ha avuto come obiettivo lo studio del sistema, la sua ottimizzazione mediante analisi numerica e il *design*, inclusi i circuiti fotonici integrati. L'attività si è sviluppata effettuando una analisi dello scenario, dei requisiti e definendo dei parametri chiave del sistema, seguita dall'ottimizzazione dell'architettura, arrivando poi alla definizione degli algoritmi e progettazione dell'*hardware*, individuando due soluzioni. Un prototipo multi-monostatico con due sensori, uno per drone, basato su un *hardware* semplificato che non richiede sviluppi tecnologici, adatto ad un trasferimento tecnologico nel breve termine. L'altra soluzione è un prototipo *multiple-input multiple-output* coerente con tre sensori fissi da installare in laboratorio. Questo *design* permetterà di dimostrare le potenzialità di un sistema distribuito coerente e di avanzare nello sviluppo di tecnologie fotoniche integrate.

INTRODUZIONE

La domanda crescente di sistemi di sorveglianza con elevata risoluzione, flessibilità e adattabilità a vari scenari operativi militari o civili ha spinto il progresso della tecnologia radar negli aspetti architettonici e nella capacità di elaborazione. In questo contesto i sistemi radar si sono rapidamente evoluti da piattaforme fisse a piattaforme mobili aeree e recentemente a configurazioni trasportate da droni, marcando uno spostamento verso approcci più flessibili, accessibili e ad alta risoluzione per diversi ambienti operativi. Un radar su singolo drone ha prestazioni ridotte se il bersaglio ha sezione radar equivalente bassa o con una grande variabilità angolare. Inoltre vi sono limitazioni di risoluzione nella direzione perpendicolare a quella di propagazione del segnale (*cross-range*), di sensibilità, di robustezza ai fenomeni di ombra. Per superare tali limitazioni si possono sfruttare radar su molteplici droni, ovvero sistemi multistatici, ma la fusione di dati acquisiti in modo indipendente limita i benefici.

In questo progetto si propone un approccio che superi queste limitazioni, basato su un sistema coerente multibanda *multiple input-multiple output* (MIMO) con elaborazione centralizzata dei dati grezzi, abilitato dalle tecnologie fotoniche. L'utilizzo di tecnologie fotoniche integrate consente di realizzare *payload* compatti, rendendo il sistema utilizzabile su droni.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

Attualmente l'uso di radar su droni è limitato a radar monostatici indipendenti [1]. Ciò limita la risoluzione in *cross-range*. Gli studi recenti sono concentrati sui sistemi radar MIMO su droni che impiegano più antenne, ottenendo un elevato guadagno di rapporto segnale-rumore e superando le limitazioni dei sistemi monostatici. I sistemi MIMO sono suddivisi in sistemi co-localizzati [2] o distribuiti [3]. I primi sono quelli maggiormente studiati e offrono *imaging*

bidimensionale sfruttando tecniche interferometriche che utilizzano una singola frequenza, con limitazioni in sensibilità e risoluzione e criticità rispetto alla variazione della riflettività del bersaglio. Recentemente sono state proposte configurazioni di radar MIMO distribuiti con alto livello di cooperazione che possono garantire migliore accuratezza di localizzazione, risoluzione spaziale, robustezza rispetto a zone d'ombra e capacità di rilevamento di *target stealth*. Questi sistemi richiedono *link* di comunicazione ad alta capacità per inviare dati grezzi dalle antenne al processore centrale, una sincronizzazione precisa e un'elevata coerenza di fase tra tutti i componenti. Una soluzione impiegando dispositivi elettronici è molto difficile.

La fotonica abilita radar distribuiti multibanda coerenti e consente la generazione e l'elaborazione di più segnali radar in diverse bande attraverso un singolo oscillatore locale, garantendo coerenza tra i segnali [4][5]. I segnali possono essere generati in una singola unità centrale e distribuiti a molteplici antenne tramite fibre ottiche o collegamenti in spazio libero. Inoltre, la fotonica garantisce stabilità in termini di rumore di fase e i collegamenti ottici permettono maggiore banda e minor sensibilità a interferenze rispetto ai collegamenti radio. Esperimenti e analisi preliminari

di sistemi MIMO distribuiti sono dimostrati su piattaforme fisse [6]. Riguardo alle tecnologie fotoniche integrate, i componenti e sottosistemi necessari per l'implementazione di un sistema radar MIMO distribuito sono già stati realizzati su *chip* [7]. Le implementazioni hanno evidenziato una bassa efficienza che può essere superata utilizzando l'integrazione ibrida.

METODOLOGIA

Si sono implementati gli algoritmi di elaborazione MIMO coerente, non coerente e multi-monostatico, costruendo il simulatore del sistema. La posizione dei droni è stata ottimizzata al variare dei parametri di progetto, identificando le potenzialità dei diversi algoritmi. La risoluzione del sistema MIMO coerente è di un ordine di grandezza superiore a quella delle specifiche di progetto, quest'ultima raggiungibile anche con un più semplice approccio multi-monostatico. L'analisi rispetto alle non idealità evidenzia come il MIMO coerente sia estremamente sensibile all'imprecisione nel posizionamento dei droni, anche con pochi millimetri di errore. Gli approcci MIMO non coerente e multi-monostatico sono molto più robusti, tollerando imprecisioni di qualche centimetro. Il *design* dell'architettura ha seguito due approcci (Figura 1): sistema multi-monostatico

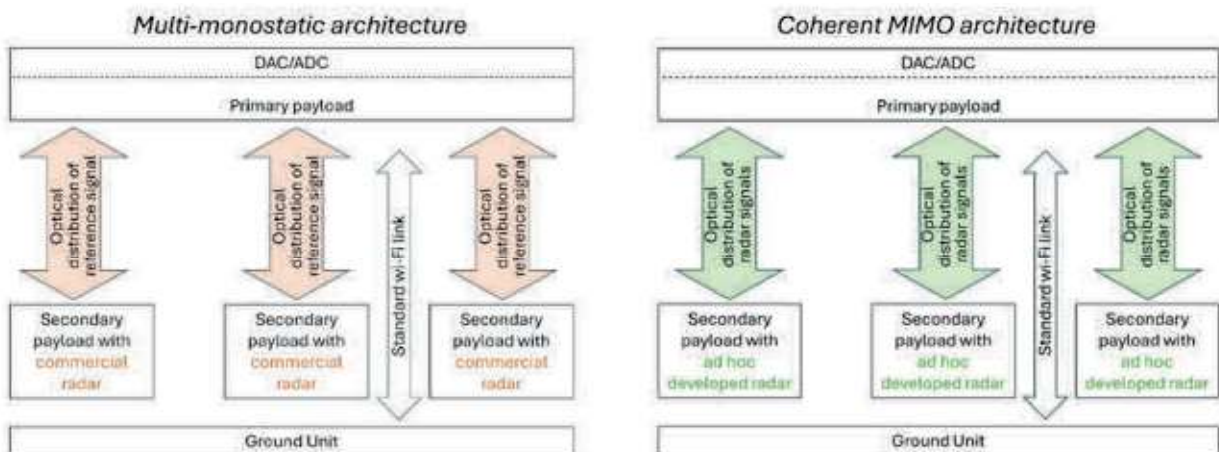


Figura 1 - Sinistra: architettura multi-monostatica basata sulla distribuzione del segnale di sincronismo (*clock*) e schede radar commerciali. Destra: Architettura MIMO coerente basata sulla distribuzione diretta dei segnali radar.

distribuito su droni e sistema MIMO coerente distribuito su piattaforme fisse e *hardware* idoneo per droni. Il primo approccio è meno complesso e massimizza la robustezza, permettendo un trasferimento tecnologico rapido. Il secondo sviluppa soluzioni tecnologiche avanzate che massimizzano i benefici del MIMO coerente, superando i limiti della non disponibilità di sistemi di posizionamento per droni sufficientemente precisi. Si è realizzata una ottimizzazione dei due sistemi in funzione del numero di droni, della geometria del sistema per disposizione lineare e quadrata, della tipologia di segnali, dell'utilizzo delle ban-

de radar. L'uso della doppia banda non offre miglioramenti significativi in risoluzione, ma aiuta nell'identificazione di bersagli *stealth*. Si è progettato l'*hardware* dei due prototipi, definendo il *budget* di potenza. Per i circuiti ottici integrati si sono considerati due approcci: uno innovativo basato su integrazione ibrida di circuiti realizzati con tecnologia Fosforo d'Indio (InP) e Niobato di Litio su Isolante (LNOI), un altro basato su integrazione monolitica InP, più matura ma con prestazioni leggermente inferiori. Le specifiche delle soluzioni proposte soddisfano sostanzialmente le specifiche di progetto (Tabella 1).

Tabella 1 - Confronto tra i valori delle architetture individuate e le specifiche di progetto.

	Architettura multi-monostatica	Architettura MIMO coerente	Specifica di progetto
Parametro	Valore	Valore	Valore
Numero di sensori	2	3	3
Portanti RF supportate	60 GHz, 24 GHz	2 portanti in banda X e Ka/V (con integrazione fotonica)	2 portanti in banda X e V
Banda istantanea totale	2 GHz (banda V), 120 MHz (banda K)	≤ 2 GHz	≤ 2 GHz
Distanza <i>target</i>	≤ 50 m	≤ 50 m	≤ 50 m
Dimensione celle risoluzione	$\leq 10 \times 10$ cm	$\leq 10 \times 10$ cm	$\leq 10 \times 10$ cm
Dimensione <i>payload</i>	$\leq 40 \times 40 \times 40$ cm	$\leq 40 \times 40 \times 40$ cm (primario)	$\leq 40 \times 40 \times 40$ cm
		$\leq 40 \times 40 \times 40$ cm (periferico)	
Peso <i>payload</i>	≤ 2.04 kg	≤ 6.4 kg (primario)	≤ 10 kg
		≤ 1.5 kg (periferico)	
Massima Potenza dissipata	≤ 17.9 W (componenti radar commerciali)	≤ 3.3 W (PIC Ibrido InP/LNOI)	≤ 12 W (per il PIC)
		≤ 1.8 W (PIC monolitico InP)	

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

Il sistema radar distribuito su droni trova applicazione in ambito militare e civile nel monitoraggio di aree di dimensioni medio-piccole con elevata risoluzione spaziale (pochi centimetri) e permette di rilevare ad esempio persone, piccoli mezzi o imbarcazioni e di mappare, utilizzando tecniche di *imaging*, il terreno e costruzioni, ad esempio in seguito a calamità naturali. Il sistema presenta i vantaggi di un radar monostatico convenzionale, ovvero può funzionare con e senza luce solare, in presenza di nebbia, pioggia e visibilità ridotta, a cui si aggiungono i vantaggi di un sistema MIMO distribuito coerente, come l'alta risoluzione, la robustezza rispetto a *target* in ombra e *stealth*. Essendo il sistema dislocabile su piattaforme mobili di piccole dimensioni come i droni, può essere facilmente trasportato dove necessario, senza bisogno di infrastrutture fisse a terra, e quindi anche in situazioni di emergenza.

Lo sviluppo della tecnologia fotonica integrata per radar coerenti distribuiti è parte centrale dell'attività di ricerca e gli enti coinvolti nel progetto la stanno portando avanti da molti anni avendo maturato molta esperienza. Le attività di sviluppo delle tecnologie InP e LNOI in questo progetto consentiranno di aumentare il grado di maturità dei sistemi radar MIMO distribuiti per piattaforme mobili.

CONCLUSIONI

Nella Fase 1 si è effettuata una analisi numerica che ha portato al progetto di due prototipi di sistema radar distribuito per droni. Un prototipo multi-monostatico su due sensori disposti in linea, con *hardware* semplificato. Un prototipo MIMO coerente su tre sensori disposti in linea da installare su piattaforme fisse in laboratorio. Quest'ultimo permette di dimostrare le potenzialità di un sistema MIMO coerente distribuito e di avanzare nello sviluppo di tecnologie fotoniche integrate. L'approccio MIMO coerente ha risoluzione molto superiore a quella preventivata in fase di proposta, presentando tuttavia elevata sensibilità alle vibrazioni che rende necessaria una stabilizzazione del drone con precisione sub-millimetrica. L'inesistenza al momento di sistemi di stabilizzazione così precisi rende possibile ad oggi solo una dimostrazione in laboratorio. L'approccio multi-monostatico è più semplice da un punto di vista implementativo e non consente la risoluzione spinta del sistema MIMO coerente, ma raggiunge comunque le prestazioni preventivate con elevata robustezza architettonica. Questa soluzione sarebbe implementabile con prodotti commerciali e non richiederebbe sviluppi tecnologici, rendendo il sistema idoneo per un trasferimento tecnologico immediato.

Le due soluzioni potrebbero essere portate avanti parallelamente nella successiva Fase 2 del progetto che contempla l'implementazione dei sistemi.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

InP	<i>Indium-Phosphide</i>
LNOI	<i>Lithium Niobate On Insulator</i>
MIMO	<i>Multiple-Input Multiple-Output</i>

PAROLE CHIAVE

Radar fotonico, radar distribuito, MIMO coerente, circuiti fotonici integrati, LNOI, InP.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	a2021.216
Amministrazione appaltante:	Direzione Armamenti Terrestri
Ente responsabile del progetto:	Associazione Temporanea di Scopo tra Scuola Superiore Sant'Anna (capofila) e Consorzio Nazionale Interuniversitario per le Telecomunicazioni (CNIT)
Città, Regione:	Pisa, Toscana
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Prof. Antonella Bogoni
Recapiti del responsabile del progetto:	Via Moruzzi 1, 56124 Pisa
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	+39 050 882221
E-mail del responsabile del progetto:	antonella.bogoni@santannapisa.it

BIBLIOGRAFIA

Articoli di rivista

- [1] Guerra A, Dardari D, Djuric PM. Dynamic Radar Networks of UAVs: A Tutorial Overview and Tracking Performance Comparison With Terrestrial Radar Networks. *IEEE Vehicular Technology Magazine*. 2020 June; 15 (2):113-120.
- [2] Li J, Stoica P. MIMO Radar with Co-located Antennas. *IEEE Signal Processing Magazine*. 2007 Sept; 24(5): 106-114.
- [3] Haimovich AM, et al. MIMO radar with widely separated antennas. *IEEE Signal Processing Magazine* 2008 Jan; 25(1):116-129.
- [4] Ghelfi P et al. A fully photonics-based coherent radar system. *Nature*. 2014; 507 (7492).
- [5] Scotti F et al. Multi-Band Software-Defined Coherent Radar Based on a Single Photonic Transceiver. *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.* 2015; 63 (2).
- [6] Maresca S et al. Coherent MIMO radar network enabled by photonics with unprecedented resolution. *Optics Letters*. 2020; 45 (14): 3953-3956.
- [7] Porzi C et al. Flexible Millimeter-Wave Carrier Generation up to the Sub-THz with Silicon Photonics Filters. *IEEE J. of Lightwave Technology*. 2021 Dec 15; 39(24):7689-7697.

Il Progetto rientra nell'area tecnologica delle reti radar multistatiche mobili per applicazioni di sorveglianza aerea in ambiente urbano utilizzando tecniche innovative riguardo il *processing* multistatico, la generazione di forme d'onda Radar e di Comunicazione e la sincronizzazione del sistema. Il quadro operativo di riferimento è attualmente caratterizzato da una crescente complessità ed incertezza, delineato da conflitti contraddistinti da spazi di manovra congestionati ma soprattutto severi da un punto di vista radar per difesa aerea, quali appunto quelli urbani, in cui ogni azione militare presenta dinamiche tattiche e di minaccia elevate.

L'architettura di rete radar mobile, per lo sviluppo e la validazione delle tecnologie prevede un solo radar trasmittente e più nodi radar cooperanti riceventi, per i quali sono necessari *link* a Radio Frequenza di comunicazione bidirezionali e di sincronizzazione per lo scambio di informazioni e controlli. Dopo lo studio di Fase I riguardo il concetto operativo e la simulazione delle tecniche radar impiegate è previsto l'utilizzo di *Breadboards* e di un dimostratore tecnologico di valutazione radar AESA.

I risultati significativi riguardano le tecniche radar multistatiche utilizzando segnali di comunicazione, per il rivelamento di *target* lenti e a bassa quota quali i droni, impieganti piattaforme di *processing* SDR (*Software Defined Radio*).

INTRODUZIONE

Lo studio di Fase I con le FFAA (Forze Armate) ha definito le caratteristiche prestazionali e i protocolli di funzionamento della rete per una sua riconfigurabilità dinamica, sviluppando le componenti fondamentali che tramite lo stesso *hardware* permettano una trasmissione RF (Radio Frequenza) di dati utilizzata anche come forma d'onda radar per un utilizzo su UGV (*Unmanned Ground Vehicle*). Tale opportunità oltre a non richiedere un *hardware* di comunicazione separato, non necessita neanche di un *setting to work* differente. La delocalizzazione del trasmettitore rispetto ai ricevitori riduce la probabilità di intercettazione, esaltando le capacità di detezione di *target stealth* in particolare in ambiente urbano. Ciò implica inoltre una riduzione del costo realizzativo dei moduli componenti riducendo i problemi di raffreddamento e di elevati assorbimenti di potenza, di installazione e di costo.

Il Progetto usa una tecnica di sincronizzazione per nodi radar cooperanti, facendo uso delle tecniche

di modulazione digitale tipiche delle comunicazioni *wireless*, con possibilità di estensione del campo di impiego del radar stesso sia in campo militare che civile. Una valenza duale è il rivelamento di UAV (*Unmanned Air Vehicle*) non autorizzati impiegati per applicazioni civili, mascherati dietro a infrastrutture, in avaria di comunicazione o in più sciame di droni.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

L'evoluzione della tipologia di conflitto relativo all'impiego di sistemi UGV e UAV impone il soddisfacimento del requisito di miglioramento della *Situational Awareness*. Ciò è possibile tramite una rete di radar cooperanti tali da garantire sorveglianza per difesa aerea e contemporaneamente, tramite lo stesso apparato RF, effettuare trasmissione dati. Gli obiettivi delle missioni cambieranno in *real-time* e rapidamente. Di conseguenza l'impiego dei radar dovrà garanti-

re una copertura volumetrica capillare variabile spazio-temporale anche in ambienti urbani e con accuratezze di localizzazione dei *target* adeguate all'impiego degli effettori utilizzati. Una rete radar di tipo multistatica su UGV per sorveglianza e comunicazione permetterà quindi il notevole miglioramento delle caratteristiche di portata e di *Low Probability of Intercept* (LPI). In un sistema radar di tipo coerente multistatico, composto cioè da trasmettitori e ricevitori delocalizzati, le funzioni di sincronizzazione delle forme d'onda trasmesse e ricevute sono tra tutte le componenti quelle più importanti e critiche. Il motivo dell'importanza e delle difficoltà implementative è legato all'interazione con il canale trasmissivo reale che, per un sistema mobile, è tipicamente tempo (*fading*) e spazio variante (oscuramenti e *multipath*). La rete di sensori sarà perciò multifunzionale, ovvero supportata da un sistema di comunicazione tramite *link* RF duale e interattivo per lo scambio di informazioni tra i nodi radar orientato all'ottimizzazione in tempo reale delle prestazioni sia di sorveglianza e *tracking*, che di controllo dei nodi e che di quello tattico operativo. In una rete a topologia *random* tempo-variante, la conoscenza del livello di qualità della sincronizzazione in *real-time* e il suo controllo, è fondamentale per l'ottenimento delle prestazioni del sistema e della missione stessa. Inoltre il sistema di sincronizzazione deve prevedere la possibilità di un attacco per *tampering* o *spoofing*, e quindi dovrà mantenere la capacità di *holdover*, tramite l'utilizzo di soluzioni alternative basate su tecniche diverse di sincronizzazione.

METODOLOGIA

Durante la prima fase del Progetto, nel Rapporto Tecnico D1.1 – “Il Concetto Operativo e i Requisiti Preliminari di Sistema”, è stato fornito un quadro di riferimento concettuale per definire gli obiettivi e gli indirizzi per la realizzazione e il mantenimento di uno strumento rilevante ed efficace, pienamente integrato nell'operatività dell'Esercito. La Figura 1

mostra un esempio di arresto dell'operatività nemica sfruttando una rete di sensori integrata.

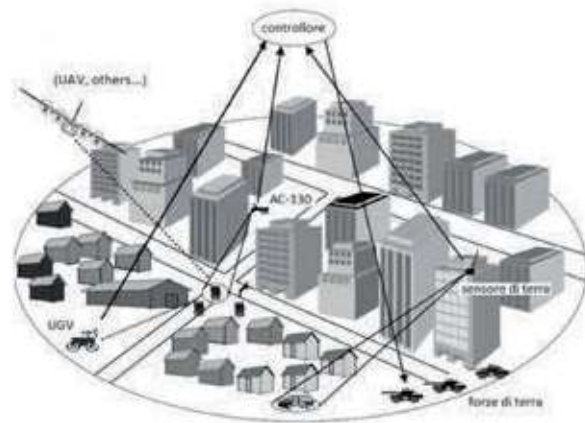


Figura 1 - Esempio di un'operazione di arresto dell'operatività nemica utilizzando una rete di sensori.

Nel Rapporto Tecnico D1.2 – “Simulazioni e *Breadboards*: Sincronismo, *RadCom* e *Processing* Multistatico (prima versione)” è stato fornito un quadro di riferimento delle tecniche identificate come i pilastri tecnologici del Progetto, quali il Sincronismo, la tecnica *RadCom* e il *Processing* Multistatico.

- Sincronismo

È stata condotta un'analisi sullo stato dell'arte della sincronizzazione su canale *wireless* in scenari radio complessi in modo da garantire un sufficiente livello di robustezza e ridurre al minimo il tempo richiesto per la trasmissione delle informazioni di temporizzazione.

- Tecnica *RadCom*

È stata definita la forma d'onda da utilizzarsi in grado di consentire sia la trasmissione di informazioni che la sorveglianza radar in modo simultaneo. L'attenzione si è focalizzata sullo studio della forma d'onda OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), mostrata in Figura 2, la quale risulta una scelta particolarmente appropriata per la progettazione di sensori che integrano le funzionalità di radar e di comunicazione.

I blocchi funzionali individuati (simulatore di forma d'onda, simulatore di scenario operativo, blocco *processing* radar, blocco *processing* comunicazioni) sono stati implementati in *Matlab*.

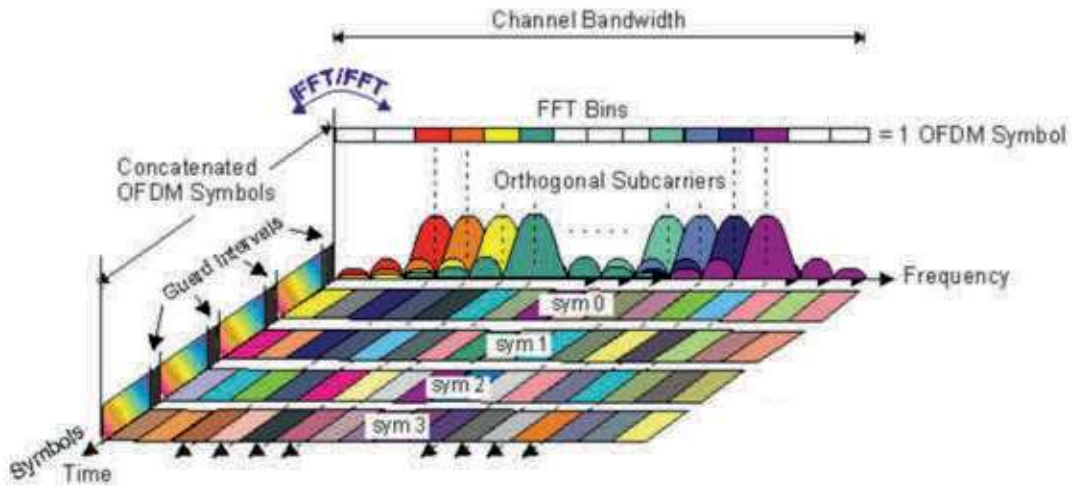


Figura 2 - Rappresentazione tempo-frequenza di una forma d'onda OFDM.

- Processing Multistatico (prima versione)**
 È stata presentata un'accurata revisione dello stato dell'arte relativamente alle tecniche di rivelazione di bersagli tramite reti di radar possibilmente in ambiente urbano e alla descrizione delle tecniche di elaborazione e di fusione delle informazioni (*Plot Extractor*) provenienti da una rete di sensori, al fine di elaborare opportunamente e in maniera centralizzata i dati acquisiti. La Figura 3 mostra come sensori multipli consentano di identificare il bersaglio 1 distinto dal bersaglio 2 rispetto all'utilizzo di un singolo sensore. Infine, sono state definite le specifiche per l'acquisto dei *Breadboard* necessari all'attività di sviluppo e validazione per gli anni successivi.

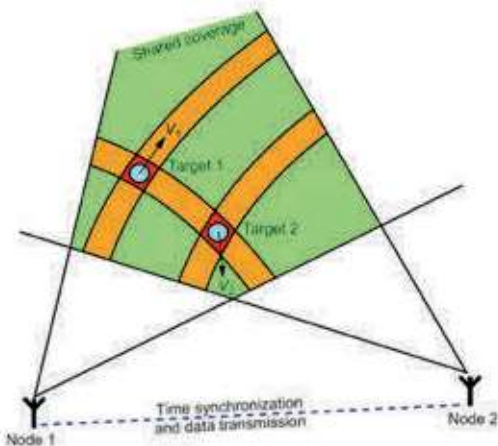


Figura 3 - Esempio di *Processing Multistatico*.

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

Le soluzioni tecnologiche sono e verranno studiate, discusse e condivise da Rheinmetall Italia con il contributo del CNIT, dell'Università di Napoli "Federico II" e dell'Università di Roma 1 "La Sapienza". Le attività di innovazione sono gestite dall'area "*Research Innovation & Technology*" di Rheinmetall Italia. L'impostazione strategica all'utilizzo delle tecnologie adottata si basa sui principi del *Design Strategico* che mira ad individuare il giusto *trade-off* nel tempo, tra requisiti utente, fattibilità tecnologica, diversificazione del prodotto, costo e sostenibilità economica. Questo prevede lo sviluppo continuo di prototipi, *breadboard*, dimostratori tecnologici e la revisione progressiva dei requisiti, che consente di sviluppare soluzioni future sulla base delle reali esigenze delle FFAA. nell'utilizzo del sistema proposto. Durante tutte le fasi di sviluppo progettuale si attivano processi continui di valutazione delle soluzioni tecnologiche adottate, per verificarne la reale efficacia tenendo in considerazione fattori come il rischio, la traiettoria evolutiva nel tempo e la convergenza tecnologica. In questo processo le FFAA. vengono considerate parte integrante del *team* di progetto e partecipa attivamente in

tutte le fasi progettuali contribuendo alla individuazione delle soluzioni che vengono via via implementate. Il progetto mira a realizzare una *partnership* con gli utilizzatori del sistema proposto e di ingegnerizzazione dei prodotti.

CONCLUSIONI

Il progetto prevede lo studio delle tecnologie e tecniche dei pilastri tecnologici di una rete radar multistatica mobile utilizzando una forma d'onda digitale di telecomunicazione per la contemporanea trasmissione di dati e sorveglianza radar in ambito urbano. Ciò trova applicazione per la sorveglianza aerea a corto raggio e a bassa quota, in particolare per un utilizzo su piattaforme UGV in ambienti operativi propagativamente complessi, soprattutto per bersagli

stealth e droni in ambiente urbano. Lo scopo è studiare, simulare e sperimentare su *Breadboard* le tecniche legate all'aspetto mobile della rete multistatica, alla tecnica *RadCom* e al sistema di sincronismo, onde individuare i limiti nonché i vantaggi per affrontare la progettazione di un prodotto futuro. L'architettura prevede un solo radar trasmittente e più nodi radar cooperanti riceventi, con i relativi *data link* RF per lo scambio di informazioni e controlli. L'attività si basa su studi bibliografici e sperimentazioni in laboratorio beneficiando delle moderne metodologie di modellazione e *fast prototyping*, basate su componenti COTS (*Commercial Off The Shelf*). Per la validazione dei concetti è previsto l'utilizzo di *evaluation board* commerciali e di un dimostratore tecnologico radar.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

AESA	<i>Active Electronic Scanned Array</i>
COTS	<i>Commercial Off The Shelf</i>
FFAA	<i>Forze Armate</i>
LPI	<i>Low Probability of Intercept</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
RADCOM	<i>Radar and Communication</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
SDR	<i>Software Defined Radio/Radar</i>
UAV	<i>Unmanned Air Vehicle</i>
UGV	<i>Unmanned Ground Vehicle</i>

PAROLE CHIAVE

Multistaticità, RADCOM, Sincronismo, OFDM, Radar, *Urban Warfare*, *Software Defined Radar*, *Radar Sensor Network*.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	a2020.280
Amministrazione appaltante:	Direzione Armamenti Terrestri
Ente responsabile del progetto:	Rheinmetall Italia S.p.A.
Città, Regione:	Roma, Lazio
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Ing. Alberto Giacomini
Recapiti del responsabile del progetto:	Via Affile, 102, 00131 Roma (RM)
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	+39 06 43611
E-mail del responsabile del progetto:	a.giacomini@rheinmetall.it

BIBLIOGRAFIA

Articoli di rivista

M. B. Kilani, “Multistatic Radar Optimization for Radar Sensor Network Applications”, Ph.D. dissertation, École de Technologie Supérieure Université du Québec, Montreal, 2018.

M. Braun, “OFDM Radar Algorithms in Mobile Communication Networks”, Ph.D. dissertation, Karlsruhe Institute of Technology, 2014.

M. A. Sarvghadi e T.-C. Wan, «Overview of time synchronization protocols in wireless sensor networks» Penang, 2014.

F. Colone, D. W. O’Hagan, P. Lombardo and C. J. Baker, “A Multistage Processing Algorithm for Disturbance Removal and Target Detection in Passive Bistatic Radar,” in IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 45, no. 2, pp. 698-722, April 2009.

F. Colone, C. Palmarini, T. Martelli and E. Tilli, “Sliding extensive cancellation algorithm for disturbance removal in passive radar,” in IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 52, no. 3, pp. 1309-1326, June 2016.

Libri e altre monografie

Keysight, «Concepts of Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) and 802.11 WLAN,» [Online]. Available: https://rfmw.em.keysight.com/wireless/helpfiles/89600B/WebHelp/Subsystems/wlan-ofdm/content/ofdm_basicprinciplesoverview.htm. [Consultato il giorno 24 Aprile 2023].

Altro materiale

Rapporto Tecnico D1.1 “Simulazioni e Breadboards: Sincronismo, RadCom e Processing Multistatico (prima versione)”, Progetto di Ricerca Tecnologica.

Rapporto Tecnico D1.2 “Il Concetto Operativo e i Requisiti Preliminari di Sistema”, Progetto di Ricerca Tecnologica.

Il progetto RADIC-5G ha lo scopo di migliorare l'efficacia dei jammer reattivi. Il progetto ottimizza la componente ES (Electronic Support), necessaria per il rilevamento (detection) e per la identificazione (ad esempio di UAS). Vengono approfonditi gli aspetti relativi alla radiogoniometria a larga banda, particolarmente importanti a causa della crescente minaccia legata all'utilizzo di droni (sia aerei che terrestri) di ultima generazione, che utilizzano sofisticati protocolli di comunicazione e navigazione.

Il progetto presenta vari aspetti innovativi, tra cui l'introduzione di una antenna a commutazione elettronica (ESA, Electronically Steered Antenna) e di un sistema interferometrico puro a larga banda (rispetto allo stato dell'arte dei sistemi interferometrici correlativi), l'utilizzo di SDR a 4 canali con banda istantanea di 200 MHz, sofisticati algoritmi di calibrazione, utilizzabili in fase operativa, e infine la classificazione di tutti i segnali presenti contemporaneamente nella banda istantanea, misurandone il rapporto S/N, la banda occupata e l'angolo (con accuratezza migliore di 1° rms), il tutto utilizzando un solo sistema di antenne, molto compatto, per la banda da 400 MHz a 6 GHz.

Il progetto ha mostrato che è possibile integrare nella generazione corrente di jammer reattivi le funzioni goniometriche (con antenna ESA oppure sistema interferometrico) e di analisi di segnali a larga banda, utilizzando le SDR sviluppate per il 5G per implementare potenti algoritmi di elaborazione dei segnali su molti canali sincronizzati. L'ES migliorato consente di operare in presenza di numerosi emittenti e con propagazione elettromagnetica variabile (applicazione veicolare e/o in scenari urbani), e porta beneficio alle funzioni EA (Electronic Attack), consentendo di ottimizzare le soglie di rilevamento, distribuire la potenza in caso di target multipli e scegliere la forma d'onda più appropriata.

INTRODUZIONE

La direzione di arrivo (DoA) di un segnale ricevuto può essere ottenuta tramite antenne direttive commutate (ESA) oppure con un interferometro. Un interferometro è un sistema che misura la DoA sulla base della fase relativa misurata tra i vari elementi di un sistema di antenne.

La DoA basata sulla fase è molto affidabile in quanto l'ampiezza di un'onda elettromagnetica presenta fluttuazioni dovute alla propagazione, mentre la fase rimane sostanzialmente inalterata, e non viene influenzata dalla dinamica del segnale ricevuto. L'applicazione dell'interferometria riguarda molti ambiti (ad esempio,

è molto usato in radio astronomia) ed esiste un'ampia letteratura sull'argomento. Le applicazioni militari sono spesso basate su sottosistemi di cinque antenne commutate su due canali [1]. Il progetto utilizza invece quattro canali sfruttando la tecnologia SDR sviluppata per la telefonia mobile (MIMO ecc.).

Lo stato dell'arte si riferisce in genere a singoli segnali a banda stretta, mentre il progetto considera segnali multipli a banda larga (ad esempio LTE o WiFi) che possono essere presenti in una banda RF. L'applicazione è principalmente quella di determinare la DoA di droni, sulla base delle loro emissioni, tuttavia lo studio può facil-

mente essere esteso ad altri segnali, per esempio ai segnali della telefonia mobile. La tecnologia sviluppata si applica sia in campo militare (bolla tattica multi-dominio) che in campo civile (protezione degli istituti carcerari, sistemi anti-UAS per grandi eventi ecc.).

**PROBLEMA INDIVIDUATO
E SOLUZIONI TECNOLOGICHE**

I requisiti di un sottosistema di antenna DF riguardano il numero di elementi, la banda RF da coprire e la accuratezza di misura desiderata. In un interferometro, è necessario utilizzare un'ampia spaziatura dell'array di antenne se si vuole ottenere un'elevata sensibilità [2]. Tuttavia la spaziatura ampia introduce ambiguità, in particolare alle alte frequenze (lunghezza d'onda di pochi centimetri), che possono essere risolte solo usando basi con varie spaziature [1][3][4]. Inoltre, le antenne hanno una dimensione fisica, e non possono essere avvicinate troppo, altrimenti si creano interazioni indesiderate (Antenna Mutual Coupling). L'array progettato, basato su layout non lineare, è illustrato in Figura 1. L'array può essere considerato un "uniform circular array" (UCA) [5]. Si tratta di una geometria ennagonale, dove nove antenne riceventi sono posizionate lungo il cerchio, e una decima antenna utilizzata per la calibrazione viene posta al centro.

METODOLOGIA

Il progetto sfrutta SDR di ultima generazione. Il processing FFT consente di realizzare un'architettura di radiogoniometria canalizzata, isolando i contributi provenienti da più segnali. La FFT presenta però errori sulla fase a causa del campionamento (in generale "non sincro" ovvero la frequenza di campionamento non multipla delle frequenze del segnale). La "all phases FFT" (apFFT) è stata introdotta in [6], e implementata con successo nel progetto. I segnali emergenti dal rumore vengono discriminati in base alla separazione spettrale. Su tali segnali opera la misurazione angolare, basata sulla stima della differenza di fase su ognuna delle diciotto basi ($\Delta\phi$), di apertura d, ottenute in 3 cicli di commutazione. Il $\Delta\phi$ è dato da:

$$\Delta\phi = \left(2 \pi \frac{d}{\lambda} \right) \sin\theta$$

La misurazione di fase dà un risultato unico nel caso in cui $\Delta\phi$ sia nell'intervallo $(-\pi, +\pi)$ con la direzione θ del segnale di arrivo nell'intervallo $(-90^\circ, +90^\circ)$, e valga la relazione:

$$d \leq \frac{\lambda}{2}$$

Se invece $d > \frac{\lambda}{2}$, come nel nostro caso, in cui la banda arriva fino a 6 GHz ($\lambda = 5$ cm), le curve $\Delta\phi = f(\theta)$ hanno il comportamento illustrato in Fi-

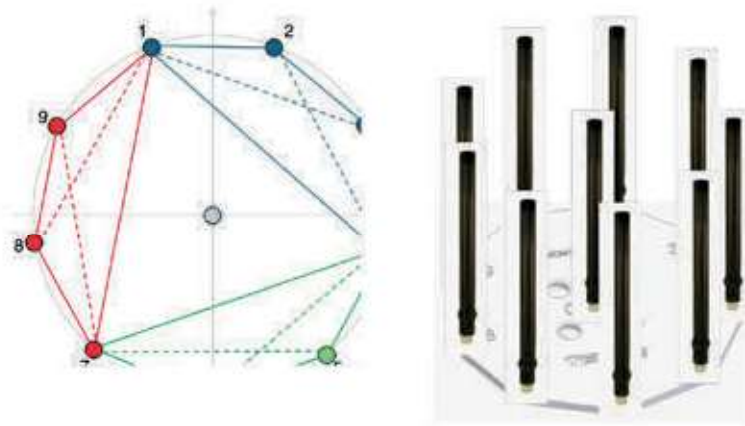


Figura 1 - L'array di antenna ennagonale sviluppato per il progetto. Vengono utilizzate diciotto basi (in 3 gruppi da sei), ognuna costituita da una coppia di antenne. La geometria scelta consente un montaggio agevolato delle antenne su una piattaforma militare, come un veicolo tattico o l'albero di una nave.

gura 2, e per coprire quasi 4 ottave di frequenza con un unico sottosistema di antenna è necessario gestire le ambiguità (a $\Delta\phi$ un corrispondono N possibili angoli):

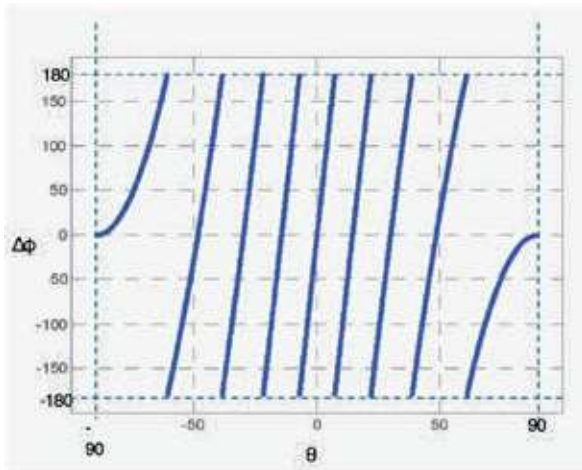


Figura 2 - Diagramma di fase, curve $\Delta\phi = f(\theta)$, mette in relazione le differenze di fase con gli angoli di provenienza del segnale. Dalla figura si vede che ad ogni $\Delta\phi$ misurato (in ordinata) corrisponde un insieme di possibili angoli θ_i (in ascissa).

Con quattro canali possiamo calcolare sei $\Delta\phi$, come mostrato nell'esempio seguente. Nella Figura 3 sono mostrati gli angoli formati da un tono (2461 MHz) posizionato a 175° rispetto alla base 1-2, per le sei basi.

Le quattro fasi misurate, sui valori di picco del segnale, per i quattro canali, sono $\phi_1: 105,37^\circ$, $\phi_2: 147,83^\circ$, $\phi_3: 62,19^\circ$, $\phi_4: -15,73^\circ$.

Le sei misure (3 con base corta e 3 con base lunga) sono mostrate sui diagrammi di fase ($\Delta\phi$ vs. θ) nella Figura 4 (basate sulla conoscenza a priori della direzione del segnale di test). C'è un buon accordo tra le misure e i valori teorici, questo significa che il sistema è stato ben calibrato.

Un'analisi completa dell'interferometria, con particolare attenzione al problema della risoluzione dell'ambiguità, è stata sviluppata in [7]. Il principale risultato del presente progetto consiste nello sviluppo di un sofisticato algoritmo di risoluzione delle

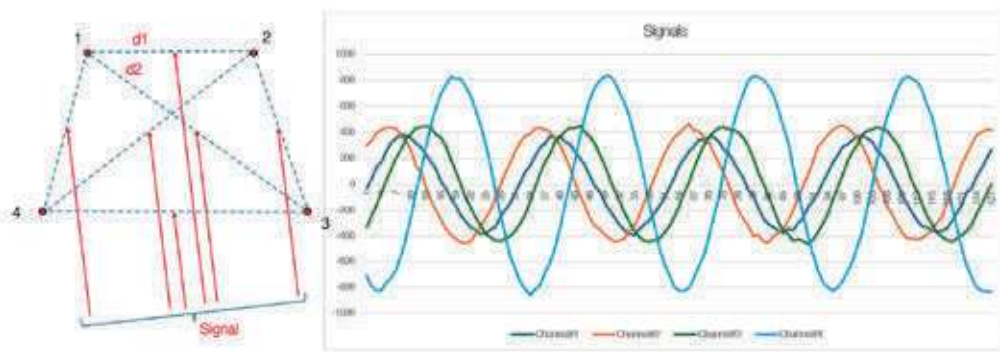


Figura 3 - Esempio di misura della DoA con 4 antenne e 6 differenze di fase $\Delta\phi$.

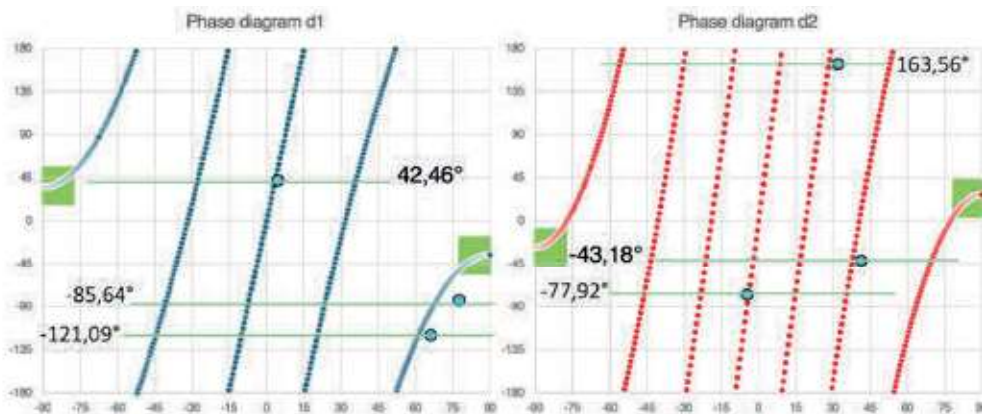


Figura 4 - Rappresentazione dei $\Delta\phi$ sui diagrammi di fase. È importante notare che ci sono zone critiche nei diagrammi di fase (evidenziate in verde), dove piccole variazioni nelle stime di $\Delta\phi$ causano grandi variazioni in θ . Queste aree corrispondono a valori di θ vicini a $\pm 90^\circ$ (e $\sin \theta$ vicini a ± 1) dove le misure $\Delta\phi$ mostrano errori maggiori (la direzione del segnale è quasi parallela alla base).

ambiguità che ha consentito di misurare gli angoli con ottima accuratezza ($< 1^\circ$ rms) su tutta la banda, utilizzando varie tipologie di antenne, con prove a TRL6 su droni reali, fino alla distanza di 1 km.

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

Il progetto ha consentito lo sviluppo di un nuovo prodotto, che arricchisce il catalogo di Tekne SpA, un radiogoniometro interferometrico compatto, facilmente integrabile con i sistemi radio-disturbatori reattivi in servizio, a cui viene così aggiunta una componente cognitiva in termini di capacità di discriminazione spaziale e identificazione spettrale di segnali a larga banda.

Questa capacità è essenziale negli sviluppi in corso riguardo alla bolla tattica multi-dominio (ovvero una serie di misure di protezione cibernetica ed elettromagnetica per salvaguardare le unità, i sistemi e le connessioni tra di essi e conseguire la superiorità cyber e di gestione dello spettro elettromagnetico).

CONCLUSIONI

Il progetto RADIC-5G ha consentito di sviluppare e sperimentare a TRL6 un jammer reattivo con capacità radiogoniometriche e di analisi di segnali

a larga banda (Figura 5 e Figura 6), con tecnologia SDR, con varie innovazioni:

- Possibilità di utilizzare una antenna ESA con commutazione molto veloce (un giro completo al secondo), anche in potenza (fino a 100 W).
- Sviluppo di un sistema interferometrico puro, non usa Tabelle di correlazione (valori di differenze di fase che devono essere misurate a priori per tutti gli angoli e tutte le frequenze di utilizzo). Viene fatta una calibrazione in frequenza, ma non in angolo. L'accuratezza di misura, grazie a un sofisticato algoritmo di risoluzione delle ambiguità, si è rivelata superiore.
- Il sistema effettua l'analisi e la classificazione dei segnali, misurandone il rapporto S/N e la banda occupata, e misura l'angolo per tutti i segnali presenti contemporaneamente nella banda istantanea.
- Il sistema interferometrico è estremamente compatto, utilizza un sistema di antenne unico per la banda da 400 MHz a 6 GHz, e non il layout classico di 3 anelli di 5 antenne per le bande bassa, media ed alta.

Gli algoritmi sono stati validati in camera anecoica, e poi sul campo, utilizzando diversi tipi di generatori di segnale e sistemi di trasmissione (inclusi droni) in ambienti realistici. L'accuratezza sulla DoA ottenuta

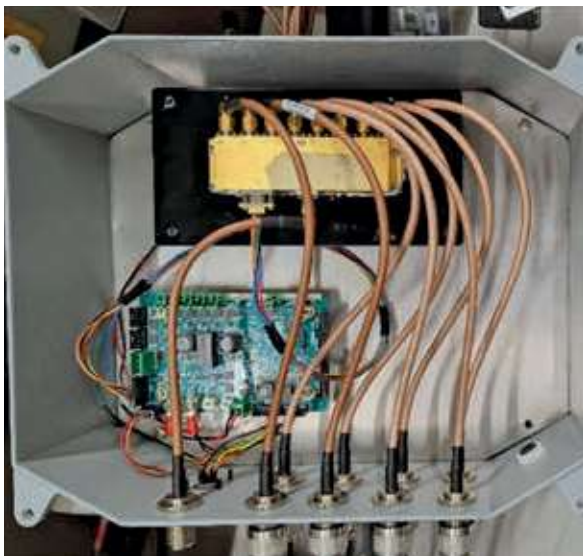


Figura 5 - Elettronica di controllo dell'antenna ESA. Sono visibili la Control Board e lo Switch di potenza a 8 porte.



Figura 6 - Il sistema interferometrico (versione a 5 antenne). Il sistema sviluppato può essere configurato con un numero qualunque di antenne, comunque disposte.

è migliore di 1° rms per il sistema interferometrico, e migliore di 30° rms per l'antenna ESA. Gli sviluppi futuri riguardano l'ingegnerizzazione a TRL7, ed in particolare la velocizzazione del sistema (porting

del software su ARM interno alla scheda e di parti del processing in FPGA), oltre alla integrazione ottimale delle antenne DF con la componente di radio-disturbo, e nella struttura del veicolo.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

apFFT	<i>All phases Fast Fourier Transform</i>
ARM	<i>Advanced RISC Machine</i>
DF	<i>Detection Finding</i>
DoA	<i>Direction of Arrival</i>
EA	<i>Electronic Attack</i>
ES	<i>Electronic Support</i>
ESA	<i>Electronically Steered Antenna</i>
FPGA	<i>Field Programmable Gate Array</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
RISC	<i>Reduced Instruction Set Computer</i>
SDR	<i>Software Defined Radio</i>
TRL	<i>Technology Readiness Level (Livello di maturità tecnologica)</i>
UAS	<i>Unattended Aerial System</i>
UCA	<i>Uniform Circular Array</i>
WiFi	<i>Wireless Fidelity (rete wireless)</i>

PAROLE CHIAVE

Reactive Jammer, Cognitive Jammer, Direction Finding, Interferometry, SDR, Cyber, UAS.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	a2018.001
Amministrazione appaltante:	Direzione Armamenti Terrestri
Ente responsabile del progetto:	Tekne S.p.A.
Città, Regione:	Ortona (CH), Abruzzo
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Ing. Francesco Barcio
Recapiti del responsabile del progetto:	Contrada Alboreto snc, 66026 Ortona (CH)
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	+39 3483108969
E-mail del responsabile del progetto:	f.barcio@tekne.it

BIBLIOGRAFIA

Articoli di rivista

Lin Shi, Cheng-li Zhang – Algorithm of signal processing with Five-Channel Interferometer - Proceedings of International Symposium on Signals, Systems and Electronics, 2010.

Jung-Hoon Lee, Jong-Kyu Kim, Hong-Kyun Ryu and Young-Ju Park – Multiple Array Spacings for an Interferometer Direction Finder with High Direction-Finding Accuracy in a Wide Range of Frequencies - IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018.

Doan SV, Vesely J, Janu P, Hubacek P, Tran XL. Optimized Algorithm for Solving Phase Interferometer Ambiguity. Radar Symposium (IRS), 2016.

Z. Wei, W. Cui, F. Li, J. Li, J. Tian, “An ambiguity-resolved correction algorithm of phase interferometer based on Kalman prediction,” in Radar Conference 2013, IET International, 2013.

H.-W. Wei and Y.-G. Shi, “Performance analysis and comparison of correlative interferometers for direction finding,” in Signal Processing (ICSP), 2010 IEEE 10th International Conference, 2010.

Xiangdong Huang, Zhaohua Wang, Limian Ren, Yifang Zeng - A Novel High-accuracy Digitalized Measuring Phase Method - Xiaoyan Ruan School of Electronics and Information Engineering, Tianjin University - ICSP Proceedings, 2008.

E. Jacobs and E. W. Ralston, “Ambiguity resolution in interferometry,” Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions, 1981.

Peter Q. C. Ly, Stephen D. Elton, Douglas A. Gray and Joy Li – A Unambiguous AOA Estimation Using SODA Interferometry for Electronic Surveillance - IEEE 7th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM), 2012.

S. Mollai, F. Farzaneh, Compact Cross Form Antenna Arrays Intended for Wideband Two Dimensional Interferometric DF Including the Channel Phase Tracking Error, International Journal of Electronics and Communications, 2017.

S. Mollai, F. Farzaneh, Wideband Two Dimensional Interferometric DF Algorithm Using Base-triangles and a Proposed Minimum Planar Array, International Journal of Electronics and Communications, 2019.

Asaf Tzur, Ofer Amrani, Avishai Wool - Direction Finding of rogue Wi-Fi access points using an off-the-shelf MIMO-OFDM receiver - Physical Communication 17 Elsevier B.V, 2015.

Libri e altre monografie

Harry L. Van Trees, “Optimum Array Processing: Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory”, Wiley-Interscience, New York, 2002.

Hayes, Monson H., Statistical Digital Signal Processing and Modeling, John Wiley & Sons, Inc., 1996.

Nell'ambito del progetto STORM - Sensori su sistemi mobili e remoti al Terahertz (PNRM a2017.153) è stato sviluppato un rilevatore THz su drone per il rilevamento di inquinanti atmosferici in grado di effettuare misurazioni in tempo reale a distanza. Il sistema combina un drone (unmanned aerial system, UAS) e la tecnologia laser THz-CW, consentendo misurazioni spettroscopiche remote flessibili e ad alta risoluzione presso il punto di interesse. Inoltre, la procedura di analisi dati e il software dedicato sviluppato nell'ambito del progetto consentono l'identificazione e la quantificazione delle sostanze target. I risultati ottenuti mostrano che il sistema combinato presenta un'elevata stabilità e non risente delle vibrazioni dell'UAS in volo nonostante l'altitudine dal suolo consentendo il rilevamento di molteplici sostanze. Il sistema di prova presentato dimostra che è possibile utilizzare il sistema combinato UAS-THz-CW per il rilevamento di inquinanti ambientali nell'atmosfera.

INTRODUZIONE

La spettroscopia THz (0,1-10 THz) sfrutta basse energie fotoniche (4,2 meV a 1 THz) che non causano ionizzazione molecolare né combustione, rendendola sicura in ambienti affollati e per soggetti biologici. Questa tecnologia consente l'analisi non invasiva di gas atmosferici, poiché molte molecole mostrano specifiche linee di assorbimento rotazionale nel range THz. Inoltre, le lunghezze d'onda coinvolte riducono l'interferenza dovuta allo scattering del particolato.

In questo lavoro, presentiamo un sensore compatto e portatile basato sulla tecnologia laser a onda continua (THz-CW) per il monitoraggio ambientale. Il dispositivo integra un database dedicato e un algoritmo di identificazione e quantificazione, permettendo il rilevamento remoto e in tempo reale degli inquinanti atmosferici.

Il prototipo realizzato nell'ambito del progetto STORM è compatto e portatile e rappresenta una soluzione innovativa per il rilevamento di gas anche quando ostacoli fisici o posizione geografica possono limitare l'analisi degli inquinanti derivanti dalle attività umane. Questa tecnologia combinata (THz-CW-UAS) apre nuove prospettive per il controllo dell'inquinamento, la conserva-

zione ambientale, e contribuisce a metodi preventivi per la sicurezza umana.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

Il monitoraggio accurato degli inquinanti atmosferici è essenziale per valutare la qualità dell'aria e mitigare l'impatto ambientale delle attività umane. Tuttavia, le tecniche attualmente disponibili presentano diverse limitazioni. I metodi convenzionali, come la spettroscopia infrarossa e le tecniche basate su campionamento, spesso richiedono strumenti ingombranti, analisi in laboratorio e tempi di risposta non immediati. Inoltre, il rilevamento di gas specifici in ambienti complessi può essere ostacolato da fenomeni di scattering e/o da interferenze spettrali.

Per superare questi limiti, proponiamo una soluzione basata sulla spettroscopia THz a onda continua (THz-CW), che offre elevata selettività e sensibilità nel riconoscimento dei composti organici volatili (VOCs). Le frequenze THz consentono di identificare con precisione gas target grazie alle loro caratteristiche linee di assorbimento rotazionale, riducendo l'influenza del particolato atmosferico.

Per rispondere a questa sfida, abbiamo sviluppato un prototipo compatto e autonomo basato su tecnologia laser THz-CW, dotato di un database dedicato e di un algoritmo avanzato per la quantificazione dei gas. Il sistema permette il monitoraggio in situ e il controllo remoto, migliorando l'efficienza e la praticità delle misurazioni. Inoltre, è progettato per essere ulteriormente miniaturizzato, ad esempio con l'adozione di una cella multipasso, rendendolo una soluzione tecnologica innovativa e applicabile in contesti critici per il monitoraggio ambientale.

METODOLOGIA

Il sistema è stato progettato combinando la tecnologia laser THz-CW con un drone (quadricottero) con un'autonomia di circa 31 minuti (carico massimo=15,06 kg) e presenta un meccanismo antivibrante in grado di ridurre i disturbi alla strumentazione (Figura 1). La radiazione THz, generata

dalla downconversion eterodina di due laser infrarossi, presenta una risoluzione elevata (≈ 10 MHz) nel range tra 0,1 e 1,1 THz. Il sistema (Figura 2), basato su fibre ottiche, include un trasmettitore e un ricevitore alloggiati in due ogive 3D, ciascuna contenente specchi per la collimazione della radiazione. La cella di campionamento in fibra di carbonio è dotata di finestre trasparenti alla radiazione THz e collegata a una pompa che aspira le sostanze gassose tramite un tubo di 5 m.

Un'antenna omnidirezionale controlla la strumentazione di bordo e trasmette dati in tempo reale alla stazione di terra. Il database sugli inquinanti gassosi, sviluppato in laboratorio, ha supportato le misurazioni di aspirazione dei singoli composti e delle loro miscele. Tutte le misure sono condotte con una risoluzione spettrale di 100 MHz e un tempo di integrazione di 10 ms per punto. In questo modo è possibile registrare gli spettri in breve tempo senza compromettere l'alta risoluzione dei dati.

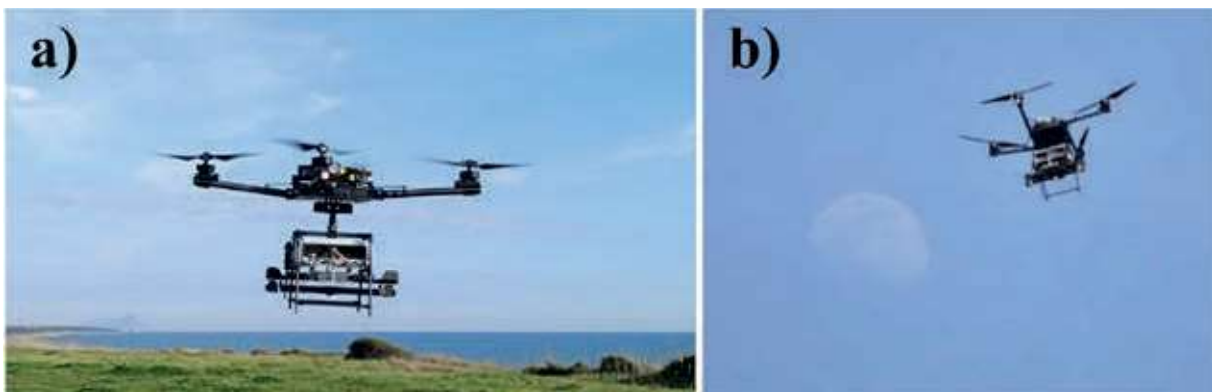


Figura 1 - Sistema combinato UAS-THz-CW durante le prove in fase di volo eseguite ad un'altitudine di a) 5 metri e b) 100 metri.

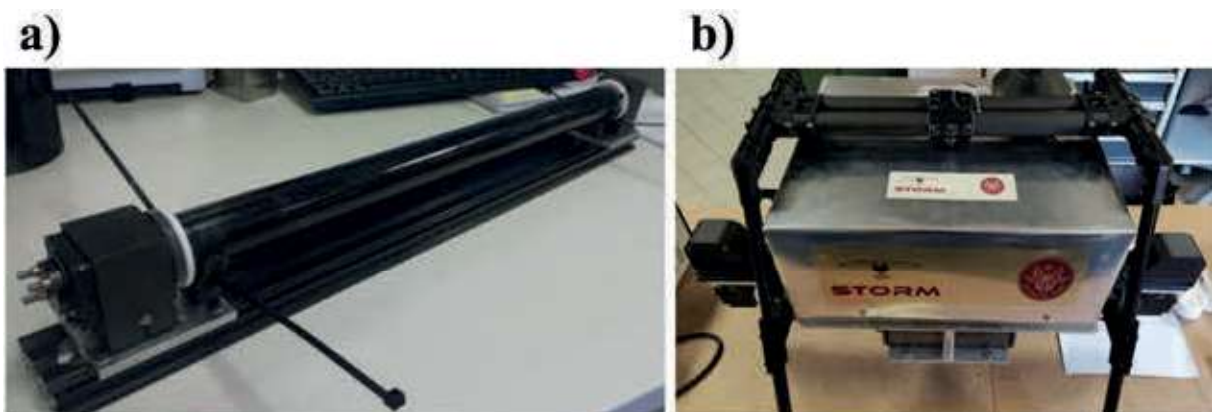


Figura 2 - Assemblaggio del sistema: a) cella di campionamento; b) cella di campionamento e sistema THz-CW.

I dati raccolti vengono elaborati con un algoritmo dedicato basato sul metodo della trasformata di Hilbert. La miscela di VOCs inquinanti contenente acetone, metanolo e diclorometano (rispettivamente 20%, 40% e 40% in volume) è stata aspirata all'interno della cella di campionamento del prototipo in volo. Partendo dal database degli spettri THz delle singole sostanze pure i segnali acquisiti sono stati elaborati secondo l'approccio ad assorbitori per sostanze non interagenti: lo spettro della miscela viene ricostruito da una combinazione lineare pesata di spettri puri (Figura 3) e i coefficienti permettono di recuperare la quantità di ciascun composto presente nella miscela (Tabella 1).

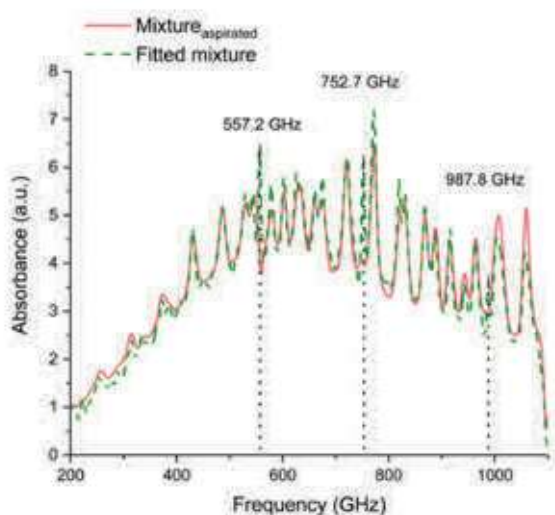


Figura 3 - Confronto tra la miscela sperimentale costituita da acetone, metanolo e diclorometano (20, 40 e 40% in volume) aspirata all'interno della cella di campionamento e indagata a distanza dal sistema THz-on-drone ad un'altitudine dal livello del suolo di 5 m e lo spettro ottenuto dai coefficienti recuperati nell'intervallo 0,2-1,1 THz. I picchi indicati sono legati agli assorbimenti di vapore acqueo (557,2, 752,3 e 987,9 GHz).

	Volume campione [%]	Coefficiente del fit [%]
Acetone	20	27
Metanolo	40	38
Diclorometano	40	35

Tabella 1 - Percentuali in volume del campione preparato e del volume ottenuto dal fit eseguito come combinazione lineare ponderata dei composti puri per la miscela multicomponente.

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

Il sistema sviluppato è in grado di identificare e quantificare composti gassosi durante la fase di volo del drone mediante il sistema di spettroscopia in fibra THz-CW. Questa configurazione consente di individuare sorgenti di emissioni gassose, come quelle provenienti dal sottosuolo, che potrebbero rappresentare un rischio ambientale e per la sicurezza umana. L'innovativa tecnologia proposta permette di monitorare in tempo reale la presenza di gas nocivi o inquinanti, fornendo un importante strumento per l'analisi dell'aria e per la prevenzione di potenziali pericoli. Oltre all'individuazione di sorgenti naturali di emissioni gassose, il sistema può essere utilizzato per il monitoraggio di emissioni antropiche, derivanti ad esempio da attività industriali, impianti di combustione, processi chimici o discariche per esempio. A questo scopo, l'ampliamento del database contenente le impronte spettrali a frequenze THz di altri composti potenzialmente dannosi consentirà di incrementare il numero di tagganti rilevabili, ottimizzando l'accuratezza nell'identificazione e nella tracciabilità delle sostanze.

Grazie alla possibilità di operare in mobilità tramite l'impiego di droni, il sistema offre un metodo di rilevamento non invasivo, rapido ed efficace, utile per il controllo ambientale e la tutela della salute pubblica. L'integrazione della spettroscopia THz-CW nei sistemi di monitoraggio ambientale rappresenta un significativo passo avanti nell'identificazione precoce delle fonti di inquinamento e nella gestione sostenibile delle risorse atmosferiche.

CONCLUSIONI

Il sistema sviluppato per la rilevazione remota di gas inquinanti tramite spettroscopia THz-CW integrata su drone è portatile e leggero, e consente misurazioni ad alta risoluzione. Durante le misurazioni a 100 metri dal suolo, il sistema ha rilevato acetone, metanolo e, per la prima volta in letteratura, il diclorometano con questa tecnologia.

I risultati mostrano un'elevata stabilità del sistema, con misurazioni coerenti rispetto a quelle di laboratorio e non influenzate dalle vibrazioni del drone. Inoltre, una pompa collegata a un tubo di 5 metri consente campionamenti puntiformi controllati da remoto, raccogliendo il gas nella cella di campionamento. Il metodo

ha permesso l'identificazione e la quantificazione degli inquinanti in miscela.

I risultati hanno dimostrato che l'integrazione di spettroscopia laser CW e drone consente il monitoraggio in tempo reale degli inquinanti atmosferici, con applicazioni nella sorveglianza ambientale e nel controllo delle emissioni industriali.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

THz	<i>Terahertz</i>
CW	<i>Continuous Wave</i>
UAS	<i>Unmanned Aerial System</i>
VOCs	<i>Composti organici volatili</i>
meV	<i>millielettronvolt</i>

PAROLE CHIAVE

Terahertz, Drone, Misure remote, Inquinamento ambientale, Gas sensing.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	a2017.153
Amministrazione appaltante:	Direzione Armamenti Terrestri
Ente responsabile del progetto:	Università di Roma La Sapienza, Dipartimento SBAI
Città, Regione:	Roma, Lazio
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Prof. Luigi Palumbo
Recapiti del responsabile del progetto:	Dipartimento SBAI, Un. La Sapienza, Via A. Scarpa 14, 00161, Roma
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	+39 06 49766533 - +39 3388561586
E-mail del responsabile del progetto:	luigi.palumbo@uniroma1.it

BIBLIOGRAFIA

Bigourd D, Cuisset A, Hindle F, Matton S, Fertein E, Bocquet R, Mouret M, Detection and quantification of multiple molecular species in mainstream cigarette smoke by continuous-wave terahertz spectroscopy, *Optics letters* 31 (15) (2006) 2356–2358.

Hindle F, Cuisset A, Bocquet R, Mouret G, Continuous-wave terahertz by photomixing: applications to gas phase pollutant detection and quantification, *Comptes Rendus Physique* 9 (2) (2008) 262–275.

Galstyan V, D'Arco A, Di Fabrizio M, Poli N, Lupi S, Comini E, Detection of volatile organic compounds: From chemical gas sensors to terahertz spectroscopy, *Reviews in Analytical Chemistry* 40 (1) (2021) 33–57.

D'Arco A, Rocco D, Magboo FP, Moffa C, Della Ventura G, Marcelli A, Palumbo L, Mattiello L, Lupi S, Petrarca M, Terahertz continuous wave spectroscopy: A portable advanced method for atmospheric gas sensing, *Optics Express* 30 (11) (2022) 19005–19016.

Tyree DJ, Huntington P, Holt J, Ross AL, Schueler R, Petkie DT, Kim SS, Grigsby CC, Neese C, Medvedev IR, Terahertz spectroscopic molecular sensor for rapid and highly specific quantitative analytical gas sensing, *ACS sensors* 7 (12) (2022) 3730–3740.

Wang W, Zhu N, Wang Z, Zhao C, Song Z, Chen X, Chao X, Efficient terahertz absorption gas sensor with gaussian process regression in time-and frequency-domain, *Sensors and Actuators B: Chemical* 369 (2022) 132349.

Passarelli A, Rice TE, Chowdhury MAZ, Powers MN, Mansha MW, Wilke I, Hella MM, Oehlschlaeger MA, Terahertz-wave absorption gas sensing for dimethyl sulfoxide, *Applied Sciences* 12 (11) (2022) 5729. Powers MN, Rice TE, Chowdhury A, Mansha MW, Hella MM, Wilke I, Oehlschlaeger MA, Dimethyl ether gas sensing using rotational absorption spectroscopy in the thz frequency region from 220 to 330 ghz, *Sensors and Actuators B: Chemical* 384 (2023) 133635.

Su K, Moeller L, Barat RB, Federici JF, Experimental comparison of terahertz and infrared data signal attenuation in dust clouds, *JOSA A* 29 (11) (2012) 2360–2366.

Demers JR, Garet F, Coutaz JL, Atmospheric water vapor absorption recorded ten meters above the ground with a drone mounted frequency domain thz spectrometer, *IEEE sensors letters* 1 (3) (2017) 1–3. Rice T, Chowdhury M, Mansha M, Hella M, Wilke I, Oehlschlaeger M, Halogenated hydrocarbon gas sensing by rotational absorption spectroscopy in the 220–330 ghz frequency range, *Applied Physics B* 127 (8) (2021) 123.

Demers JR, Coutaz JL, Garet F, Sadwick LP, Yang T, A uav-mounted thz spectrometer for real-time gas analysis, *SPIE 10531, Terahertz, RF, Millimeter, and Submillimeter-Wave Technology and Applications XI*, 105310K (23 February 2018) (2018).

Smith RM, Arnold MA, Selectivity of terahertz gas-phase spectroscopy, *Analytical chemistry* 87 (21) (2015) 10679–10683.

Slocum DM, Slingerland EJ, Giles RH, Goyette RM, Atmospheric absorption of terahertz radiation and water vapor continuum effects, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 127 (2013) 49–63.

Zhang H, Zhang Z, Zhao X, Zhang X, Zhang T, Cao C, Yu Y, Qualitative and quantitative analysis of atmospheric methanol using a continuous-wave terahertz spectrometer, *Chinese Optics Letters* 16 (10) (2018) 103001.

Il progetto PACMAN (*Proficient Artificial intelligence Counter Mine Autonomous vehicles*) mira a sviluppare un sistema di veicoli autonomi per operazioni di bonifica mine, utilizzando tecniche avanzate di riconoscimento automatico dei *target* (ATR) basate su intelligenza artificiale. Il sistema include veicoli subacquei autonomi (AUV) e veicoli di superficie autonomi (ASV) che cooperano per migliorare l'efficienza e la sicurezza delle operazioni. Durante la fase 1, sono stati sviluppati e testati algoritmi di ATR, copertura autonoma e cooperazione multi-veicolo, con risultati promettenti.

INTRODUZIONE

Il progetto PACMAN si inserisce nel contesto delle operazioni di *Mine Counter Measures* (MCM), dove l'uso di veicoli autonomi dotati di sistemi di riconoscimento automatico dei *target* (ATR) è fondamentale per migliorare l'efficienza e la sicurezza delle operazioni. Il progetto mira a sviluppare un sistema modulare e riconfigurabile di veicoli autonomi, capaci di eseguire operazioni di bonifica in modo autonomo e in tempo reale.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

Il progetto PACMAN affronta il problema della bonifica mine in contesti marittimi, dove l'uso di veicoli autonomi può migliorare significativamente l'efficienza e la sicurezza delle operazioni. Attualmente, le operazioni di *Mine Counter Measures* (MCM) richiedono un'intensa attività di analisi post-missione, con *team* di operatori altamente qualificati che esaminano grandi volumi di dati raccolti da veicoli *unmanned*. Questo processo è lungo e laborioso, e comporta rischi per il personale coinvolto.

Le operazioni *Mine Counter Measures* (MCM) attuali prevedono attività lunghe e onerose di *Post-Mission Analysis* (PMA), richiedendo l'analisi manuale di grandi volumi di dati da parte di operatori altamente specializzati ed esponendo il personale a potenziali rischi. Il progetto PACMAN propone un sistema basato su veicoli autonomi sottomarini (AUV) di piccole dimensioni, facilmente

deployabili, che grazie alla tecnologia di riconoscimento automatico di oggetti (ATR) e alla navigazione precisa, forniscono in tempo reale una mappa dettagliata dei potenziali *target*. Questo approccio rappresenta un moltiplicatore di forza, riduce il rischio per gli operatori e migliora notevolmente l'efficienza delle operazioni di bonifica mine.

Le soluzioni tecnologiche proposte dal progetto PACMAN includono:

1. **Architettura ATR:** Sviluppo di metodologie di ATR basate su reti convoluzionali neurali (CNN), che costituiscono lo stato dell'arte in questo settore dell'intelligenza artificiale [1, 2, 3, 4, 5]. Queste soluzioni permettono agli AUV di analizzare in tempo reale le immagini acquisite dai sensori di *payload*, come *Forward-Looking Sonar* (FLS) e *Side Scan Sonar* (SSS). Gli algoritmi di ATR sono progettati per riconoscere e localizzare mine e oggetti simili, riducendo sensibilmente la mole di dati da esaminare.
2. **Veicoli Autonomi:** Progettazione e realizzazione di AUV compatti, modulari e riconfigurabili, dotati di sensori avanzati per la navigazione e la raccolta dati. Questi veicoli sono in grado di eseguire missioni di bonifica in modo autonomo, utilizzando tecniche di navigazione precisa e algoritmi di pianificazione autonoma del percorso di copertura (*Coverage Path Planning*, CPP) [6, 7, 8].
3. **Cooperazione Multi-Veicolo:** Implementazione di un sistema di cooperazione tra AUV e *Autonomous Surface Vehicle* (ASV), che funge

da *gateway* di comunicazione tra il dominio subacqueo e quello a radiofrequenze. Questo sistema permette di migliorare la localizzazione degli AUV e di trasmettere dati rilevanti agli operatori in tempo reale.

Nella figura 1 viene rappresentato il veicolo X300 equipaggiato con i *payload* dedicati per le finalità di questo progetto, mentre in figura 2 viene rappresentato il tipico scenario di cooperazione multiveicolo.

4. Comando e Controllo: sviluppo e prototipazione di un sistema di *Situational Awareness* per la gestione delle missioni. Tale ap-

plicativo, realizzato come interfaccia utente *user-friendly*, consente agli operatori di pianificare, gestire e monitorare in modo semplice e intuitivo le attività dei veicoli autonomi coinvolti, nonché di visualizzare in tempo reale gli output sintetici generati dal sistema di ATR. Queste soluzioni tecnologiche mirano a migliorare l'efficienza, la sicurezza e la rapidità delle operazioni di bonifica mine, riducendo il rischio per il personale e ottimizzando l'uso delle risorse disponibili. In figura 3 vediamo alcune delle possibili visualizzazioni.



Figura 1 - Render del veicolo autonomo X300 progettato per il PNRM PACMAN. In particolare sono resi evidenti i sensori di cui è dotato il veicolo per fare detezione, classifica e riconoscimento delle potenziali minacce subacquee.



Figura 2 - Rappresentazione della vignetta con la cooperazione multi-veicolo, in cui si evince l'interazione tra un veicolo autonomo subacqueo, uno di superficie e l'Unità navale di appoggio.

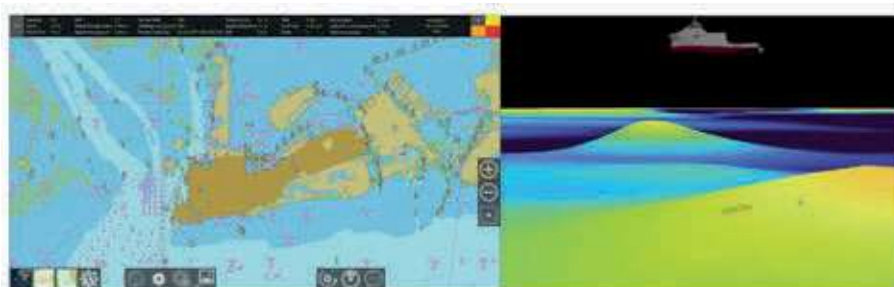


Figura 3 - Sistema di Comando e Controllo per la pianificazione e la gestione delle missioni.

METODOLOGIA

Fase 1: Studio di Fattibilità e Sviluppo di Algoritmi

Durante la prima fase, sono stati condotti studi di fattibilità per valutare lo stato dell'arte e identificare le soluzioni tecnologiche più promettenti. Questa fase ha incluso le seguenti attività:

- **Analisi dello Stato dell'Arte:** Revisione delle tecnologie esistenti nel campo del riconoscimento automatico dei *target* (ATR) e della copertura autonoma, con particolare attenzione alle reti neurali convoluzionali (CNN).
- **Sviluppo di Algoritmi di ATR:** Implementazione e test di algoritmi di ATR utilizzando immagini acustiche ottenute da sensori *Forward-Looking Sonar* (FLS) e *Side Scan Sonar* (SSS). Sono state confrontate diverse architetture di reti neurali per identificare quelle che rappresentano il miglior compromesso tra ottimizzazione delle prestazioni e riduzione della potenza computazionale richiesta.
- **Progettazione e Realizzazione di Piattaforme di Test:** Costruzione di prototipi di veicoli autonomi (AUV e ASV) equipaggiati con sensori avanzati per la navigazione e la raccolta dati. Questi prototipi sono stati utilizzati per testare gli algoritmi sviluppati in condizioni controllate.
- **Sviluppo di Algoritmi di Copertura Autonoma:** Implementazione e test di un algoritmo di

Coverage Path Planning (CPP) per ottimizzare la copertura di aree *target*, tenendo conto delle caratteristiche dei sensori e dei vincoli operativi dei veicoli autonomi.

Fase 2: Integrazione dei Sistemi e Test Operativi

La seconda fase del progetto prevede l'integrazione dei componenti *hardware* e *software* sviluppati nella fase 1 e la loro validazione attraverso test operativi in mare. Le attività principali includono:

- **Integrazione Hardware e Software:** Assemblaggio dei sistemi completi, combinando i prototipi di veicoli autonomi con gli algoritmi di ATR e copertura autonoma. Questa attività assicura che tutti i componenti funzionino in modo sinergico.
- **Test in Mare e Validazione:** Conduzione di test operativi in ambienti reali per valutare le prestazioni dei sistemi integrati. Questi test permettono di verificare l'efficacia delle soluzioni proposte e di identificare eventuali aree di miglioramento.

La metodologia adottata garantisce un approccio rigoroso e sistematico allo sviluppo delle tecnologie PACMAN, assicurando che ogni fase del progetto sia supportata da attività di ricerca e sviluppo ben definite e mirate. In figura 4 si possono vedere alcuni dei risultati ottenuti dai primi test in mare.

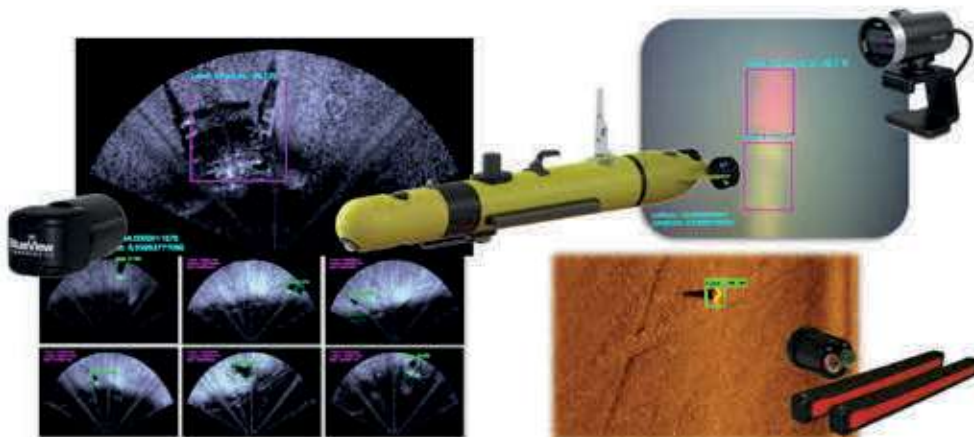


Figura 4 - Dati raccolti durante i test in mare con diversi sensori e funzionamento dei diversi algoritmi di ATR.

Risultati

Durante la fase 1 del progetto, sono stati ottenuti i seguenti risultati:

- **Realizzazione piattaforme di test X300 e MGB 300 – ASV:** Sono state realizzate le piattaforme necessarie al contesto operativo del progetto PACMAN, che comprende l'utilizzo di un veicolo X300 equipaggiato con modulo missione e di una boa *gateway* MGB300.
- **Progettazione moduli per sensoristica di missione:** Sono state effettuate la progettazione meccanica e l'integrazione della componentistica all'interno del modulo missione PACMAN.
- **Selezione e *procurement* sensoristica di missione:** È stata selezionata ed acquistata la sensoristica necessaria allo svolgimento della missione nel contesto operativo PACMAN (computer di bordo, sensori di navigazione, sensori percettivi, etc.).
- **Realizzazione algoritmi di *Automatic Target Recognition* (ATR):** Sono state testate metodologie allo stato dell'arte per effettuare segmentazione di istanze con immagini FLS e SSS; è proposta un'accurata analisi quantitativa dei risultati ottenuti.
- **Realizzazione algoritmi di *Autonomous Coverage* (AC):** È stato proposto e testato in simulazione un algoritmo di CPP specificamente sviluppato per coprire in modo ottimale un'area selezionata con AUV dotato di sensore FLS.
- **Realizzazione algoritmo di cooperazione ASV-AUV:** È stata realizzata l'architettura *software* per la cooperazione tra ASV-AUV, insieme al protocollo acustico per la comunicazione; sono stati riportati i risultati ottenuti dai test simulativi.

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

Le tecnologie sviluppate nel progetto PACMAN hanno potenziali applicazioni sia in ambito militare che civile. In ambito militare, il sistema

può essere utilizzato per operazioni di bonifica mine, sorveglianza subacquea e ricerca e soccorso (*Search and Rescue*) in scenari complessi o pericolosi. In ambito civile, le tecnologie di ATR e copertura autonoma possono essere applicate a operazioni di monitoraggio ambientale, ricerca archeologica subacquea e ispezione di infrastrutture sottomarine.

Monitoraggio Ambientale: I veicoli autonomi possono effettuare monitoraggi continui della qualità dell'acqua, rilevare inquinanti, individuare oggetti di interesse ambientale e valutare lo stato di salute degli ecosistemi marini, facilitando interventi tempestivi e mirati.

Ricerca Archeologica Subacquea: I sistemi avanzati di riconoscimento automatico consentono l'individuazione, la mappatura e il monitoraggio continuo di siti archeologici sommersi, agevolando la scoperta e preservazione di reperti storici e culturali.

Ispezione di Infrastrutture Sottomarine: I veicoli autonomi possono condurre ispezioni dettagliate di infrastrutture critiche come oleodotti, gasdotti, cavi sottomarini e piattaforme *offshore*, identificando tempestivamente danni, anomalie o guasti per migliorare la manutenzione preventiva e ridurre i costi operativi.

Sorveglianza e Sicurezza Portuale: I sistemi PACMAN possono sorvegliare aree portuali, rilevando minacce e proteggendo infrastrutture critiche, con operazioni autonome e trasmissione di dati in tempo reale per risposte rapide.

CONCLUSIONI

Il progetto PACMAN ha dimostrato la fattibilità e l'efficacia delle soluzioni tecnologiche proposte per migliorare le operazioni di bonifica mine attraverso l'uso di veicoli autonomi. Durante la fase 1, sono stati sviluppati e testati algoritmi avanzati di riconoscimento automatico dei *target* (ATR), copertura autonoma e cooperazione multi-veicolo, con risultati promettenti. Le piattaforme di test X300 e MGB 300 – ASV sono state

realizzate con successo, e la sensoristica di missione è stata selezionata e integrata. Gli algoritmi di ATR basati su reti neurali convoluzionali hanno mostrato elevate prestazioni nella segmentazione di immagini FLS e SSS. L'algoritmo di copertura autonoma ha dimostrato di poter coprire in modo ottimale un'area selezionata, mentre l'architettura *software* per la cooperazione ASV-AUV ha garantito una comunicazione efficace e una navi-

gazione precisa. Le tecnologie sviluppate hanno potenziali applicazioni sia in ambito militare che civile, migliorando la sicurezza, l'efficienza e la sostenibilità delle operazioni subacquee. La fase successiva del progetto prevede l'integrazione dei sistemi e la loro validazione attraverso test operativi in mare, con l'obiettivo di consolidare i risultati ottenuti e di esplorare ulteriori applicazioni delle tecnologie sviluppate.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

AC	<i>Autonomus Coverage</i>
ASV	<i>Autonomus Surface Vehicle</i>
ATR	<i>Automatic Target Recognition</i>
AUV	<i>Autonomus Underwater Vehicle</i>
FLS	<i>Foward Looking Sonar</i>
MCM	<i>Mine Counter Misure</i>
SSS	<i>Side Scan Sonar</i>
PMA	<i>Post Mission Analysis</i>

PAROLE CHIAVE

ATR, AUV, MCM

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	a2021.093
Amministrazione appaltante:	Direzione Armamenti Navali
Ente responsabile del progetto:	Graal Tech S.r.l.
Città, Regione:	Genova, Liguria
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Ing. Andrea Caffaz
Recapiti del responsabile del progetto:	Via E. Tagliolini, 26, 16152 Genova (GE)
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	+39 3480746551
E-mail del responsabile del progetto:	andrea.caffaz@graaltech.it

BIBLIOGRAFIA

1. Jocher, G., Chaurasia, A., & Qiu, J. (2023). Ultralytics YOLO (Version 8.0.0) [Computer software]. <https://github.com/ultralytics/ultralytics>
2. He, K., Gkioxari, G., Dollár, P., & Girshick, R. (2017). Mask r-cnn. In Proceedings of the IEEE international conference on computer vision (pp. 2961-2969).
3. Wang, X., Kong, T., Shen, C., Jiang, Y., & Li, L. (2020). Solo: Segmenting objects by locations. In Computer Vision—ECCV 2020: 16th European Conference, Glasgow, UK, August 23–28, 2020, Proceedings, Part XVIII 16 (pp. 649-665). Springer International Publishing.
4. Bolya, D., Zhou, C., Xiao, F., & Lee, Y. J. (2019). Yolact: Real-time instance segmentation. In Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision (pp. 9157-9166).
5. Bochkovskiy, A., Wang, C. Y., & Liao, H. Y. M. (2020). Yolov4: Optimal speed and accuracy of object detection. arXiv preprint arXiv:2004.10934.
6. Bircher, A., Kamel, M., Alexis, K., Oleynikova, H., & Siegwart, R. (2016, May). Receding horizon\” next-best-view\” planner for 3d exploration. In 2016 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA) (pp. 1462-1468). IEEE.
7. Karaman, S. & Frazzoli, E., “Sampling-based algorithms for optimal motion planning,” The international journal of robotics research, vol. 30, no. 7, pp. 846–894, 2011.
8. Zacchini, L., Ridolfi, A. & Allotta, B.. (2020). Receding-horizon sampling-based sensor-driven coverage planning strategy for AUV seabed inspections. 1-6. 10.1109/AUV50043.2020.9267903.

La propulsione dei veicoli autonomi (AUV) o semi-autonomi (ROV) subacquei di recente realizzazione è usualmente di tipo elettrico trasmessa attraverso eliche, *water-jet* o *pump-jet*, che genera rumore idrodinamico, soprattutto ad alte velocità, rendendo il veicolo facilmente individuabile. La ricerca in esame si propone di ottimizzare le caratteristiche del veicolo, sia dal punto di vista della resistenza idrodinamica del mezzo sia per quanto riguarda il rumore generato, progettando e realizzando un prototipo di veicolo autonomo *fish-like* a propulsione *bio-inspired*. Il programma, sviluppato da un ATS costituita dal CNR-INM e dall'Università degli Studi di Roma La Sapienza, giunto al termine della fase 2, ha consentito, a valle della progettazione di dettaglio, la realizzazione di un modello prototipale filoguidato (l'obiettivo finale è quello di un veicolo completamente autonomo) per la valutazione delle capacità propulsive della pinna propulsiva principale nonché la definizione di test funzionali atti a valutare la costruzione e l'assemblaggio del prototipo, la capacità di movimentazione delle componenti di attuazione, l'acquisizione dei dati sensoriali e l'integrazione generale. L'intero programma rappresenta una sfida in termini di scelta dei materiali, realizzazione di un prototipo compatto, silenzioso e dotato di idrodinamica e propulsione innovativa.

INTRODUZIONE

Il controllo del dimensione subacquea rappresenta una sfida di pressante attualità che ha spinto la ricerca tecnologica degli ultimi anni con molteplici finalità sia di natura militare (*data collection*, contributo alla *situation awareness*, monitoraggio e protezione delle infrastrutture subacquee critiche) sia civile (acquisizione dati, protezione dell'ecosistema). In tale ambito si è assistito al proliferare di sistemi subacquei autonomi e semi-autonomi di diverse tipologie e dimensioni i cui contenuti tecnologici sono principalmente mirati ad ottenere sempre maggiori autonomie e discrezione. La ricerca di una maggiore autonomia si basa sullo sviluppo di sistemi di stoccaggio dell'energia sempre più efficienti (batterie agli ioni di litio, *fuel cell*) e sul contenimento dei consumi del mezzo attraverso accorgimenti tecnici e progettuali sempre più sofisticati. La discrezione viene ricercata principalmente attraverso l'impiego di sistemi di propulsione silenziosa ma anche mediante l'utilizzo di rivestimenti mimetici, materiali amagnetici e in generale a bassa segnatura ottica, acustica, magnetica, ecc.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

La ricerca di soluzioni tecnologiche tese a minimizzare i consumi del mezzo e ad aumentarne la discrezione passa anche attraverso lo studio di forme e modalità propulsive bio-mimetiche. In particolare la locomozione attraverso l'impiego di una pinna caudale che simuli in maniera efficace i movimenti di un pesce pone sfide tecnologiche di particolare interesse perché coinvolge studi sui materiali da impiegare e sulle frequenze più efficaci sia da un punto di vista propulsivo che di silenziosità del sistema nel suo complesso. Il risultato finale atteso è quindi lo sviluppo di un pesce robotico caratterizzato da capacità di locomozione silenziosa ed efficiente, per l'esplorazione e la raccolta dati autonoma e il progetto si concentra sullo sviluppo e l'elaborazione della struttura propulsiva idrodinamica mediante lo studio di una coda bio-mimetica, della struttura robotica e dell'implementazione di algoritmi di guida relativi al movimento del veicolo sottomarino

bio-mimetico. Lo stoccaggio energetico è garantito attraverso l'impiego di batterie agli ioni di litio.

METODOLOGIA

L'obiettivo finale del progetto è la realizzazione di un prototipo operativo in ambiente controllato in grado di dimostrare l'affidabilità, l'efficacia e l'efficienza di una piattaforma bio-mimetica per le sopracitate attività sottomarine. Il prototipo così concepito e realizzato servirà a fornire indicazioni di progettazione e costruzione ingegnerizzata per sistemi operativi in scenari reali.

La fase 1 del progetto ha avuto come oggetto, attraverso lo studio dei possibili profili di missione e dello stato dell'arte, la definizione dei requisiti funzionali e di progettazione di massima che sono riassunti di seguito:

- lunghezza: 1.5 - 2.0 [m]
- peso stimato: 20 [Kg]
- velocità: 0.5 - 1.5 [m/s]
- range massimo di missione: 1000 [m]
- morfologia: *semi/full fish-like*

Nel corso della fase 2 si è proceduto alla progettazione di dettaglio con l'obiettivo di disporre, al termine della fase stessa di un prototipo operativo in ambiente controllato in grado di dimostrare l'affidabilità, l'efficacia e l'efficienza di una piattaforma bio-mimetica per le sopracitate attività sottomarine. La progettazione di dettaglio ha portato ad individuare i componenti del sistema a partire dagli elementi di intelaiatura che compongono la struttura portante del prototipo, con le relative appendici di supporto e bloccaggio dei differenti moduli e dispositivi da alloggiare all'interno del corpo del mezzo. Sono stati quindi identificati i motori elettrici per l'attuazione delle parti mobili, nello specifico, della pinna propulsiva principale, le pinne stabilizzatrici e le vesciche natatorie per la regolazione della quota di immersione. Analoga selezione è avvenuta per i dispositivi sensoristici necessari alla navigazione del mezzo e la raccolta dati nell'ambiente operativo. In ultimo è stato progettato lo schema funzionale delle differenti

componenti software dell'architettura di gestione e controllo del mezzo, tramite cui vengono implementate le funzionalità di impiego autonomo. Inoltre si è proceduto alla progettazione e realizzazione di un setup sperimentale per la valutazione delle capacità propulsive della pinna caudale al fine di ottimizzare le scelte geometrico-operative, includendo inoltre la sperimentazione di diversi materiali per la parte terminale della pinna, al fine di valutare quello a prestazioni migliori (Figura 1).

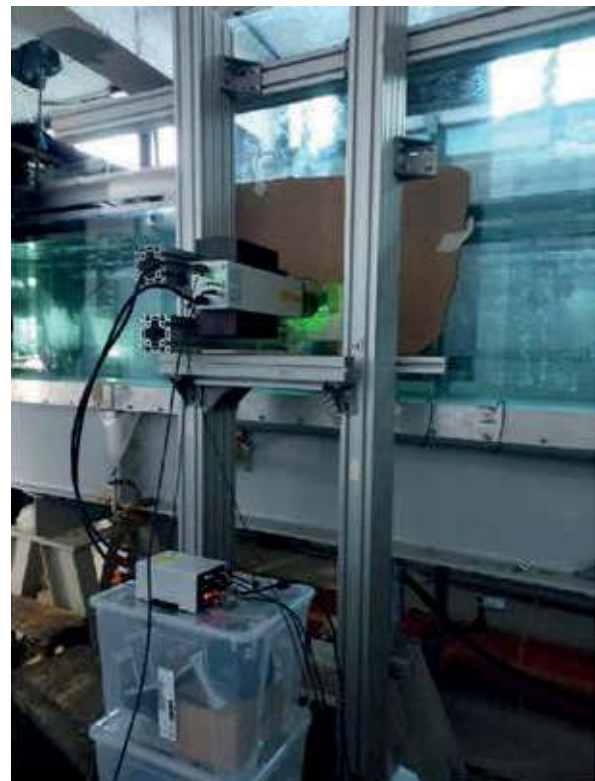


Figura 1 - Setup sperimentale per la valutazione delle capacità propulsive della pinna caudale.



Figura 2 - Frame catturato durante i test di valutazione propulsiva della parte flessibile della coda tramite telecamera veloce.

La fase successiva ha riguardato la realizzazione del prototipo PERSICO. In particolare, la finalizzazione dei disegni tecnici costruttivi e di assemblaggio delle parti consistenti l'intelaiatura e le appendici di supporto e bloccaggio, i disegni degli alloggiamenti dei sistemi di attuazione, relativi riduttori meccanici e cinematismi di trasmissione del moto per la movimentazione dei giunti, contenitori a tenuta e relativi componenti accessori per il montaggio di tutti i moduli funzionali.

Il *work package* conclusivo della Fase 2 ha riguardato la sperimentazione preliminare focalizzata sulla definizione ed esecuzione dei test preliminari per le singole componenti del sistema: sensori, sistemi di attuazione, moduli software e architettura

di controllo nonché i test di verifica generali in vasca del prototipo.

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

Il target di missione standard per il prototipo PERSICO potrà essere attività di perlustrazione/scoperta/raccolta dati nell'area di interesse. Si prevedono due modalità operative:

- ambito civile - raccolta dati ambientali; il sensore di interesse per tali dati potrà essere un dispositivo CTD (*Conductivity, Temperature, Depth*) per la caratterizzazione della salinità e temperatura nella colonna d'acqua. In questa modalità potrebbe essere previsto il supporto di strumentazione

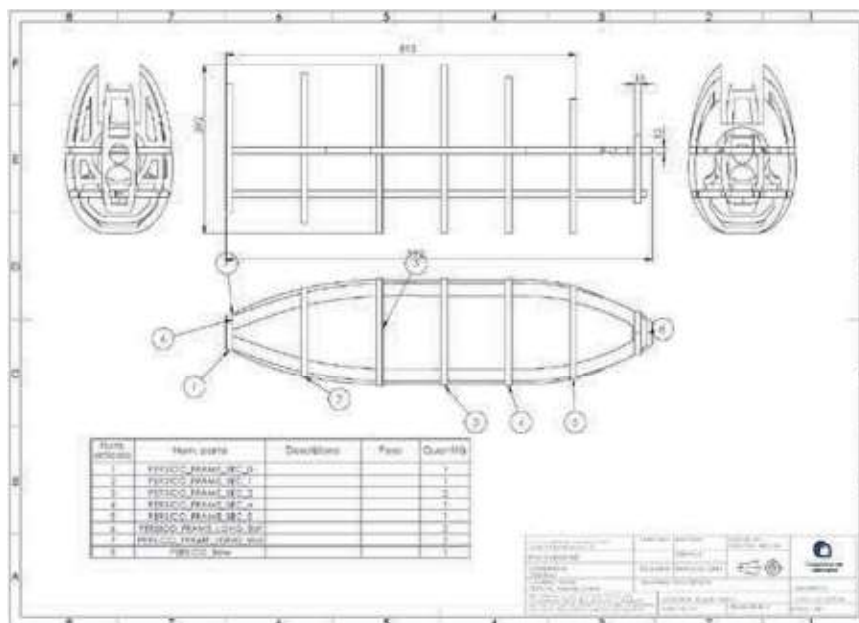


Figura 3 - Disegno tecnico dell'intelaiatura.



Figura 4 - Il prototipo PERSICO durante la fase di assemblaggio.



Figura 5 - Il prototipo di PERSICO durante le prove in vasca al CNR-INM Roma.

zione acustica attiva (con conseguente immissione di rumore acustico nell'area operativa) per la localizzazione *real-time* del robot durante la missione e l'eventuale comunicazione di parametri operativi (stato di funzionamento del robot, aggiornamento dei punti di interesse, allarmi).

- ambito militare - perlustrazione e scoperta su area di interesse; si impiegherà un idrofono per il rilevamento di *asset* ignoti e la caratterizzazione dei relativi profili acustici. In questa modalità l'operatività del sistema robotico potrà essere completamente autonoma, pertanto non vi sarà localizzazione/comunicazione tra stazione operatore e robot.

CONCLUSIONI

Il programma PERSICO ha consentito di arrivare, fin dal completamento della seconda delle tre

fasi previste, alla realizzazione e test in vasca di un prototipo di pesce robotico caratterizzato da dimensioni significative che consentono una discreta flessibilità in termini di *pay-load* e da un sistema di propulsione innovativo e tecnologicamente avanzato. Il dimensionamento stesso del mezzo rappresenta un compromesso ottimale tra le esigenze di silenziosità e discrezione e quelle di autonomia e capacità di carico. Nel corso del successivo sviluppo, per il quale si ritiene senz'altro opportuna l'attivazione della fase tre, potranno essere ottenuti ulteriori affinamenti e miglioramenti sia in termini di efficacia del trattamento esterno, attraverso ad esempio un rivestimento in neoprene che ne esalti le caratteristiche mimetiche sia nello sviluppo del sistema di guida ed esecuzione delle missioni autonomo.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

ROV	<i>Remotely Operated Vehicle</i>
AUV	<i>Autonomous Underwater Vehicle</i>
ATS	<i>Associazione Temporanea di Scopo</i>
CNR-INM	<i>Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto di Ingegneria del Mare</i>

PAROLE CHIAVE

Drone, Subacqueo, Pesce, Robotico, Bio-mimetico, AUV, ROV.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero contratto:	a2019.034
Amministrazione appaltante:	Direzione Armamenti Navali
Ente responsabile del progetto:	Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto di Ingegneria del Mare - Università degli Studi di Roma La Sapienza
Città, Regione:	Genova, Liguria - Roma, Lazio
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Ing. Marco Bibuli
Recapiti del responsabile del progetto:	Via De Marini 6 – 16149 Genova
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	+39 3665680477
E-mail del responsabile del progetto:	marco.bibuli@cnr.it

Il progetto SAFE ha l'obiettivo di studiare la capacità automatica di verifica dell'integrità e della sicurezza di *firmware* utilizzati nei sistemi di automazione, indipendentemente dalla disponibilità del relativo codice sorgente, in quanto lo sviluppo e l'aggiornamento dei *firmware* sta diventando un elemento sempre più critico nei processi di gestione del ciclo di vita degli apparati di *Information Technology* (IT) e *Operational Technology* (OT). Nelle prime due delle tre fasi del progetto in questione è stata sviluppata una piattaforma prototipica di analisi del *firmware* applicando reti neurali ricorrenti con auto-attenzione (*self-attentive RNN*) capaci di riconoscere la similarità tra file binari e tra funzioni in linguaggio *assembly*. L'attività di ricerca ha generato un set di documentazione tecnica di progetto, che riassume lo stato dell'arte nell'ambito dell'uso delle reti neurali applicate all'analisi dei *files* binari, e gli scenari d'uso per la messa in sicurezza (sicurezza cibernetica) delle *supply chain*. Il prototipo *software* realizzato è in grado di identificare codice malevolo negli eseguibili del *firmware* e la versione delle librerie utilizzate per la sua compilazione. Questo a favore di un controllo approfondito della configurazione degli apparati IT e OT dei sistemi di automazione e a supporto degli analisti di sicurezza cibernetica nelle fasi di aggiornamento delle piattaforme.

INTRODUZIONE

Il progetto si pone l'obiettivo di studiare e definire i migliori modelli ed i più efficaci algoritmi per implementare una capacità automatica di verifica dell'integrità e della sicurezza dei *firmware* utilizzati nei sistemi di automazione, sia di piattaforme terrestri che navali, indipendentemente dalla disponibilità del relativo codice sorgente.

Il controllo puntuale della configurazione *software* dei sistemi informativi e dei sistemi d'arma sta diventando una parte essenziale dei controlli necessari a garantire la sicurezza cibernetica degli impianti, infatti l'uso sempre più estensivo di sistemi *Commercial Off The Shelf* (COTS) in tali sistemi rende la sicurezza della *supply chain* un elemento estremamente critico.

Il progetto prevede in particolare l'utilizzo di tecniche avanzate di *Machine Learning* volte ad analizzare direttamente il codice binario al fine di identificare eventuali alterazioni del *software*.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

Il problema individuato è quello di verificare l'integrità e la sicurezza dei *firmware* utilizzati nei sistemi di automazione, indipendentemente dalla disponibilità del relativo codice sorgente.

Tale problema può essere trattato scomponendolo nei seguenti due sotto-problemi:

- a. verifica dell'integrità del *firmware* installato su un sistema di automazione in servizio, attraverso l'analisi automatica della similitudine tra funzioni; tale attività consente di verificare se due versioni differenti di *firmware* provengano o meno dal medesimo codice sorgente quando questo non sia disponibile, ovvero di individuare se vi siano sorgenti differenti per le due versioni di *firmware*.
- b. verifica della somiglianze e analisi delle differenze delle funzionalità presenti nei diversi *firmware*, quando si riscontrano due versioni di *firmware* non identiche che non derivano

dallo stesso codice (i.e. due versioni successive dello stesso *firmware*).

La soluzione tecnologica individuata per affrontare il sopraindicato problema si basa su reti neurali. Tali reti, una volta addestrate, consentono di utilizzare un minor numero di risorse computazionali rispetto ad altre tecnologie e offrono buone prestazioni in termini di tempo.

In particolare, il progetto si concentra sull'uso di reti neurali ricorrenti con auto-attenzione (Lin et al., 2017), approfondite nella sezione metodologica. I meccanismi di attenzione rappresentano un importante avanzamento nelle reti neurali moderne, permettendo di focalizzarsi sulle parti più rilevanti dell'input per risolvere il problema in modo più efficace.

L'analisi dei codici binari avviene tradizionalmente con tecniche statiche, dinamiche o di esecuzione simbolica. Sebbene accurate, queste metodologie sono onerose in termini di tempo e risorse. Un'alternativa è l'intervento di esperti in *Reverse Engineering*, che analizzano manual-

mente il codice con strumenti di supporto. Tuttavia, il loro costo elevato e la complessità del compito limitano il numero di binari analizzabili in un dato periodo.

Soluzioni dello stato dell'arte con reti neurali si basano su reti neurali su grafi e l'uso di *feature* manuali (Xu et al., 2017). Nel progetto SAFE si è deciso di non usare *feature* manuali in quanto molti studi recenti mostrano come esse siano sub-ottime rispetto a *feature* automatiche.

METODOLOGIA

Il progetto SAFE ha portato allo sviluppo di un prototipo che consente all'utente di analizzare il *firmware* di un sistema *embedded* a partire dal solo codice binario. Il cuore del progetto è una rete neurale, che trasforma le funzioni da codice *assembly* in vettori numerici (i cosiddetti *embedding*, un esempio è mostrato nella successiva Figura 1). Su questi è possibile calcolare una similarità semantica tra le funzioni utilizzando la distanza euclidea.

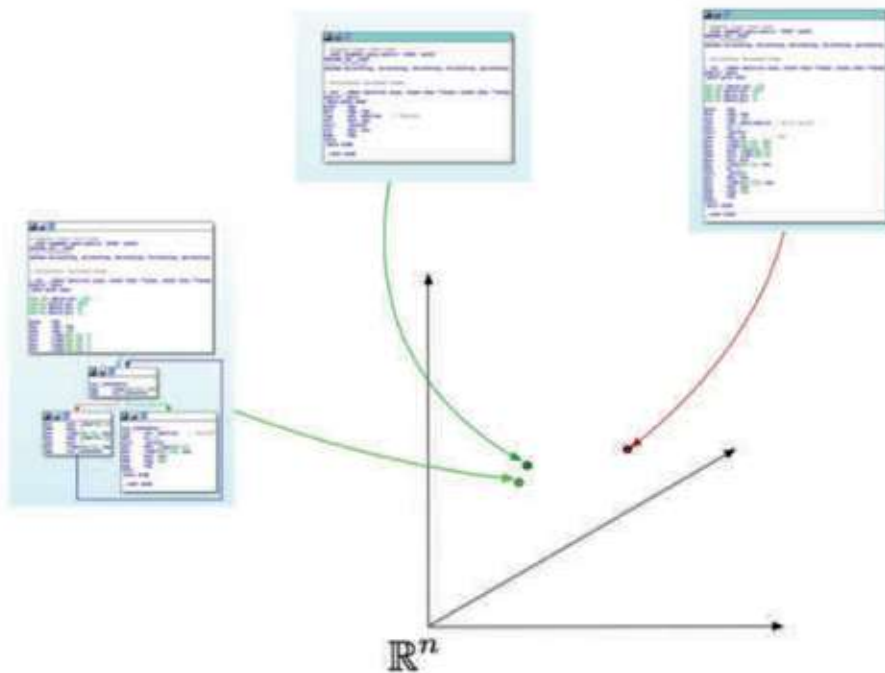


Figura 1 - Esempio di trasformazione di funzioni *assembly* in vettori di *embedding*. Nella figura tre diverse funzioni *assembly* sono trasformate in tre vettori, le due funzioni simili vengono trasformate in altrettanti vettori vicini (punti verdi). La funzione dissimile viene trasformata in un vettore di *embedding* più distante dagli altri (punto rosso).

Uno schema ad alto livello del funzionamento di questa rete neurale è mostrato in Figura 2. La funzione in codice *assembly* viene prima trasformata in una sequenza di vettori attraverso un meccanismo che converte ogni istruzione *assembly* in un vettore di *feature* denso. La metodologia utilizzata è un adattamento di *Word2Vec* (Mikolov et al., 2013), originariamente sviluppato per il linguaggio naturale, applicato al codice *assembly*. Questi vettori vengono poi elaborati da una rete neurale ricorrente con auto-attenzione, una tecnica precedentemente impiegata in letteratura per l'analisi del linguaggio naturale. Un aspetto innovativo del progetto è stato lo sviluppo di tecniche per rendere il codice *assembly* compatibile con queste soluzioni, mediante l'uso di strategie di *pre-processing* volte a ridurre il numero di istruzioni *assembly* analizzabili dalla rete.

La rete neurale SAFE è stata addestrata a generare *embedding* utilizzando la tecnica dell'addestramento "siamese". Con questa tecnica, si creano due copie della rete che vengono addestrate su coppie di funzioni: le reti devono produrre vettori vicini quando la coppia in ingresso è simile e vettori distanti quando è dissimile. Un esempio di rete siamese è mostrato in Figura 3.

L'addestramento è stato eseguito su *dataset* sviluppati nell'ambito del progetto, composti da milioni di funzioni in codice *assembly*.

Nella seguente Figura 4 si riportano i risultati di alcune prove condotte che evidenziano le prestazioni della rete SAFE.

Negli esperimenti si è misurata la precisione (numero di risultati corretti sul totale) e il richiamo (numero di risultati positivi individuati sul totale di positivi) della rete quando è utilizzata per cercare una funzione in un database dei simili.

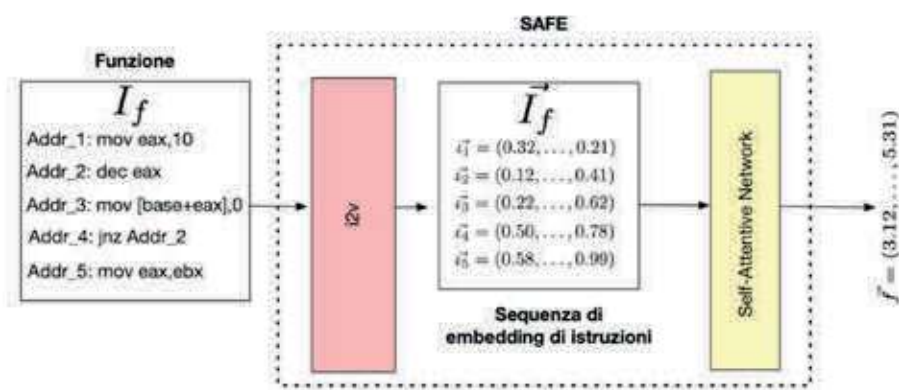


Figura 2 - Architettura di alto livello della rete neurale SAFE. La rete prende in ingresso una funzione in codice *assembly* e la trasforma in un vettore numerico.

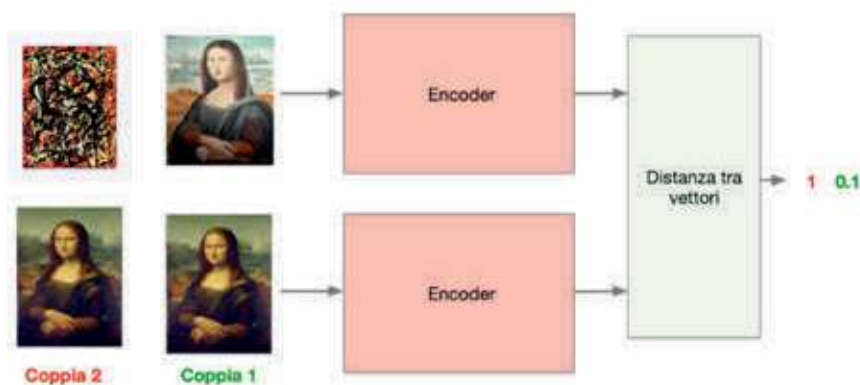


Figura 3 - Esempio di addestramento "siamese". Alla rete vengono fornite coppie simili (nella figura l'immagine della Gioconda e la sua riproduzione) e coppie dissimili (nella figura l'immagine della Gioconda e del quadro astratto). Le reti devono produrre vettori distanti nel caso dissimile e vicini nel caso simili, i valori di distanza in rosso e verde a destra.

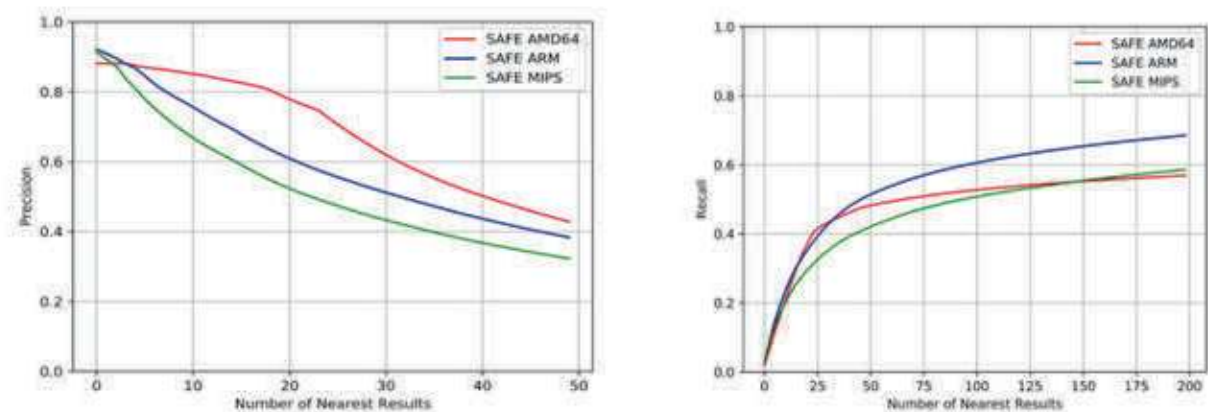


Figura 4 - Risultati della rete SAFE su dataset di test per funzioni X64, ARM e MIPS.

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

I risultati ottenuti nel PNRM SAFE possono avere ricadute applicative importanti nell'ambito del controllo della possibile compromissione della *supply-chain* dei sistemi *embedded* anche in ambito militare.

L'utilizzo di SAFE come strumento di verifica della validità del *firmware* permetterebbe infatti il controllo della sicurezza del *firmware* da parte dell'utente finale, prima di aggiornare il dispositivo stesso. Il sistema SAFE restituisce a valle dell'analisi un *report* che può essere utilizzato per rilevare la presenza di anomalie o di librerie obsolete e vulnerabili e quindi di potenziali *malware*.

In caso di anomalie rilevate l'operatore potrebbe interrompere la procedura di aggiornamento ed inviare il *firmware* ad un controllo approfondito di *Reverse Engineering*.

CONCLUSIONI

L'analisi dei *firmware* tramite la metodologia individuata da SAFE si dimostra un metodo efficace per individuare eventuali anomalie o la presenza di librerie obsolete all'interno dei *firmware* stessi, senza dover ricorrere all'analisi del codice sorgente. Il sistema si è dimostrato efficace sulle principali architetture *hardware* utilizzate nei sistemi *embedded* come X86, ARM e MIPS. L'utilizzo di SAFE è stato sperimentato sia su sistemi di automazione di tipo civile che militare, restituendo risultati promettenti in entrambi i casi. L'eterogeneità delle tipologie di *firmware* presenti nei vari sistemi utilizzati in ambito militare rappresenta un'importante sfida e potrà essere affrontata nel corso dell'ultima fase del progetto (Fase 3). L'indagine di nuove tecniche di analisi, lo studio di nuove architetture emergenti e il miglioramento delle performance in termini di tempi di analisi e accuratezza della rilevazione rappresentano sicuramente dei potenziali sviluppi del progetto.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

SAFE	<i>Self-Attentive Function Embedding for embedded Systems</i>
IT	<i>Information Technology</i>
OT	<i>Operational Technology</i>
RNN	<i>Recurrent Neural Network</i>
COTS	<i>Commercial Off The Shelf</i>

PAROLE CHIAVE

Reverse engineering, Firmware integrity, Binary similarity, Reti neurali, Supply-chain, Malware analysis, AI, Embedded system.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	a2019.195
Amministrazione appaltante:	Direzione degli Armamenti Navali (NAVARM)
Ente responsabile del progetto:	CY4GATE S.r.l. e Università degli Studi di Roma La Sapienza
Città, Regione:	Roma, Lazio
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Dott. Carmine Grelle
Recapiti del responsabile del progetto:	Via Morolo, 92, 00131 Roma (RM)
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	+39 3336687904
E-mail del responsabile del progetto:	carmine.grelle@cy4gate.com

BIBLIOGRAFIA

- Lin, Z., Feng, M., dos Santos, C. N., Yu, M., Xiang, B., Zhou, B., & Bengio, Y. (2017) “*A structured self-attentive sentence embedding*. In *International Conference on Learning Representations (ICLR)*”.
- Xu, X., Liu, C., Feng, Q., Yin, H., Song, L., & Song, D. (2017) “*Neural network-based graph embedding for cross-platform binary code similarity detection*. *Proceedings of the 24th ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security (CCS)*, 363–376”.
- Mikolov, T., Chen, K., Corrado, G., Sutskever, I., & Dean, J. (2013) “*Distributed representations of words and phrases and their compositionality*. In *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*, 26, 3111-3119”.

L'impiego di mezzi a pilotaggio remoto sta acquisendo rilevanza sempre maggiore, anche grazie all'evoluzione delle tecnologie di trasmissione dati e dell'Intelligenza Artificiale a supporto degli operatori. Nonostante i citati sviluppi, un numero ancora rilevante di attività militari rimane svolta utilizzando assetti tradizionali, direttamente pilotati dal personale di bordo a causa delle limitazioni nell'integrazione dei sistemi remoti con le attuali soluzioni di Comando e Controllo.

Il sistema SCIAMANO ha come obiettivo lo studio dell'integrazione di tali sistemi senza pilota con il modello di un'unità navale di superficie tradizionale. La prima fase del progetto ha riguardato la definizione dei requisiti operativi, di sistema, manutentivi e di esercizio del sistema SCIAMANO e dei suoi sottosistemi, fino alla realizzazione di un progetto concettuale della nave porta droni che soddisfi i vincoli fisici e funzionali identificati.

L'attività condotta è stata di fondamentale importanza per definire i requisiti e individuare le sfide e le possibili soluzioni legate all'integrazione di sciame di droni nelle piattaforme navali. Il progetto di una nave porta droni rappresenta, infatti, un banco di prova per affrontare concretamente i problemi ingegneristici che si pongono rispetto ai progetti più convenzionali. I risultati ottenuti hanno permesso di definire modelli di simulazione/design necessari a validare soluzioni ottimali.

INTRODUZIONE

Un elevato numero di attività militari marittime viene oggi svolta utilizzando assetti di superficie o sottomarini tradizionali, pilotati con un'efficacia consolidata ma limitata e con l'esposizione dell'equipaggio ai rischi associati. L'impiego a supporto di singoli mezzi a pilotaggio remoto è oggi parzialmente integrato a causa delle limitazioni legate alle attuali soluzioni di Comando e Controllo e alle architetture di Comunicazione. Non di meno, sempre maggiore rilevanza è data dalla necessità di coordinamento dei gruppi di droni (c.d. sciame), affinché agiscano in modo combinato con le logiche di condotta autonoma dei singoli elementi.

Il sistema SCIAMANO si propone, attraverso la gestione di sciame di droni ("swarm") di superficie, subacquee e aeree, di aumentare l'efficacia e la persistenza legate all'esecuzione di attività militari, riducendo o eliminando del tutto l'esposizione del personale ai rischi correlati.

Il progetto ha quindi la finalità di mettere alla prova il design di una Nave affrontando sfide tecnologiche e di progettazione volte a poter integrare i predetti sciame di droni a bordo delle unità navali. Le soluzioni tecnologiche che definiscono il sistema SCIAMANO si basano sulla selezione e personalizzazione di droni specifici, sullo sviluppo di un nuovo sistema C3 (Comando, Controllo e Comunicazione), sulla progettazione di appositi sistemi di lancio e recupero a mare, sulla definizione di logiche specifiche per svolgere funzioni non presidiate e autonome.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

Lo studio della prima fase si è concentrato sul definire il *Concept Design* della nave porta droni SCIAMANO, comprendente un sistema C3 evoluto per la gestione operativa di sciame di veicoli *unmanned* (droni), i relativi sistemi di lancio e

recupero, e tutte le strutture necessarie per l'imbarco, lo sbarco, la preparazione e condotta della missione e della manutenzione.

SCIAMANO dovrà essere quindi in grado di gestire sciami di veicoli senza pilota aerei, di superficie (navali ed eventualmente terrestri) e subacquei, da impiegare per operazioni con nave isolata e/o inserita in un contesto cooperante più complesso. L'ambito operativo preso a riferimento include tutte le attività militari identificate a livello NATO all'interno dello standard MTP-01. Si tratta di operazioni condotte dal mare mediante l'applicazione di diverse forme di lotta; sono escluse le operazioni antiaeree, ma vengono incluse anche le attività di assistenza militare e attività duali, come ad esempio le indagini ambientali.

Centrale nel progetto è stata la definizione delle logiche di coordinamento degli sciami di droni affinché agiscano in modo combinato con le logiche di condotta autonoma dei singoli elementi. La gestione di aggregazioni coordinate di droni (sciame, o gruppo) è stata analizzata sia nel caso omogeneo (es. tutti droni aerei) che eterogeneo (es. combinazione droni di superficie, subacquei e aerei) al fine di aumentare l'efficacia e la persistenza legate all'esecuzione di tali attività, minimizzando l'esposizione del personale a minacce e/o rischi diretti.

La definizione della nave SCIAMANO è stata, quindi, guidata dall'obiettivo di giungere a un'integrazione funzionale e armonica dei droni e dei loro sottosistemi abilitanti con l'architettura nave, valutando nuove possibili configurazioni per le future unità navali. Il progetto ha previsto inoltre l'identificazione dei requisiti del sistema SCIAMANO nella sua interezza e l'individuazione dei componenti hardware, con particolare focus su prodotti COTS, e delle tecnologie abilitanti.

METODOLOGIA

Durante la prima fase del progetto sono stati innanzitutto identificati e definiti i Requisiti Operativi e la loro allocazione ai sottosistemi, le tecnologie abilitanti che permettono la realizzazione del sistema SCIAMANO, i requisiti fisici e funzionali unitamente a quelli manutentivi e di esercizio.

Successivamente il focus si è spostato sugli elementi abilitanti per la realizzazione della nave SCIAMANO, identificando una soluzione tecnica che implementi gli elementi hardware, tramite componenti *Commercial Off-the-Shelf* (COTS), componenti adattati o progettati specificatamente, e gli elementi software definendone le logiche.

Infine sono state delineate, sulla base dei risultati ottenuti, le principali caratteristiche della nave



Figura 1 - Vista prospettica del concept di Nave SCIAMANO.

SCIAMANO dettate dai requisiti operativi, fisici e funzionali identificati e dalle soluzioni che permettono l'integrazione dei suoi sottosistemi. In tal senso è stato definito il *draft* di una Nave che permetta di validare i vincoli e le scelte progettuali da impiegare attraverso la determinazione dei principali fattori dimensionali (lunghezza, dislocamento, ...), il *top side* e i principali locali interni. L'attenzione è stata concentrata sugli elementi abilitanti per la realizzazione della nave SCIAMANO e in particolare sulle soluzioni per l'integrazione delle tipologie di sistemi *unmanned* e dei loro apparati di lancio/recupero, unitamente alle aree e le predisposizioni per il loro supporto logistico-manutentivo.

In Figura 1 è visibile una vista prospettica di una ipotetica Nave che soddisfa i predetti requisiti, mentre in Figura 2 è riportata una delle soluzioni identificate per l'impiego di droni subacquei (c.d. *moon-pool*).

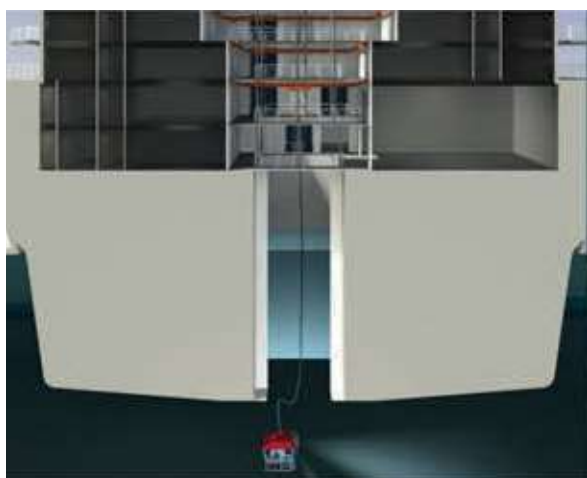


Figura 2 - Soluzione identificate all'interno dei concept di Nave SCIAMANO per l'impiego di droni subacquei.

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

L'attività condotta nella prima fase del progetto è stata di fondamentale importanza per definire i requisiti che devono essere posseduti da una piattaforma navale in grado di operare con sciami di droni. È stato inoltre possibile focalizzare l'attenzione sui sottosistemi capaci di integrare le tecnologie di pilotaggio remoto di mezzi e rispondere ai

requisiti operativi imposti dagli scenari di impiego delle unità della Marina Militare.

Il *concept* di nave e dei sottosistemi individuati non rappresenta un prodotto finito a se stante, ma fornisce la base per successivi sviluppi o integrazioni di sistemi a pilotaggio remoto su unità navali di nuova concezione o attualmente in linea. In tal senso è possibile elevare il grado di operatività della Marina Militare nei domini di lotta sotto e sopra la superficie impiegando organicamente mezzi *unmanned*.

CONCLUSIONI

Gli esiti conseguiti al termine della prima fase del progetto sono risultati molto positivi in quanto affini alla linea di innovazione tecnologica perseguita dalla Difesa. Negli attuali e futuri scenari geostrategici, infatti, l'impiego di nuove unità navali dotate di varie tipologie di droni aerei, ma anche navali e subacquei, consentirà di effettuare una serie di missioni di *intelligence* e sorveglianza ad ampio raggio, unitamente ad azioni di disturbo e saturazione delle difese avversarie tramite sciami.

Lo studio di una nave porta droni rappresenta, infatti, un concreto ambito di analisi volto ad affrontare in modo tangibile le sfide ingegneristiche che emergono rispetto ai progetti più convenzionali. I risultati ottenuti con SCIAMANO hanno permesso di definire modelli di simulazione e di design necessari a identificare e validare le soluzioni ottimali.

Il proseguo del programma permetterà di completare quanto già realizzato attraverso l'impiego di un modello virtuale che verrà utilizzato per la valutazione di prestazione ed efficacia del progetto negli scenari operativi di riferimento. Questo si affiancherà alle tradizionali metodologie di *system engineering*, progettazione navale e convalida del concetto operativo al fine di porre le basi per lo sviluppo di un *digital twin* da impiegare a supporto del design di altre unità navali di nuova generazione dotate di capacità analoghe ai requisiti di SCIAMANO.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

C3	<i>Comando, Controllo e Comunicazione</i>
COTS	<i>Commercial Off-the-Shelf</i>

PAROLE CHIAVE

Droni, *Unmanned*, Portadroni, C3, *Concept*, *Digital Twin*.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	a2021.047
Amministrazione appaltante:	Direzione degli Armamenti Navali - NAVARM
Ente responsabile del progetto:	NAVARM – 2° Reparto 4 [^] Divisione
Città, Regione:	Roma, Lazio
Titolo e nome del responsabile del progetto:	CV (GM-GN) Andrea Pugina
Recapiti del responsabile del progetto:	NAVARM – 2° Reparto 4 [^] Divisione, Via di Centocelle 301, Roma
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	+39 06 469132574
E-mail del responsabile del progetto:	andrea.pugina@marina.difesa.it

Il progetto WAVE (*Wearable Assistant for VEterans in sport*), svolto in collaborazione tra Centro Veterani della Difesa (CVD), Scuola Superiore Sant'Anna (SSSA), Università degli Studi di Roma "Foro Italico" (FOROIT) e IRCCS Fondazione Don Carlo Gnocchi ONLUS (DON-GNOCCHI), si propone di migliorare la qualità di vita del paziente veterano, incentivando alla pratica sportiva mediante la realizzazione e l'utilizzo di una rete di sensori indossabili, dotata di interfaccia persuasiva. A tal fine, verranno sviluppati e testati metodi computazionali avanzati e personalizzati atti alla valutazione quantitativa del gesto sportivo. Verrà infine sviluppata un'interfaccia persuasiva volta a fornire un *feedback* all'atleta orientato all'ottimizzazione della sua prestazione e al contenimento del rischio di infortunio. Il sistema sviluppato all'interno di WAVE, costituito quindi dall'integrazione di *hardware* (sensoristica indossabile) e *software* (algoritmi di analisi dati avanzati e interfaccia persuasiva), ha come obiettivo ultimo il miglioramento della qualità di vita del paziente/atleta veterano con disabilità.

INTRODUZIONE

L'efficacia della pratica sportiva per persone con disabilità è ampiamente documentata, con benefici che si estendono non solo alla sfera fisica ma anche a quella psicologica e motivazionale. Lo sport, infatti, promuove l'autostima, la socializzazione e il senso di autoefficacia, contribuendo a ridurre l'isolamento sociale e l'insorgenza di stati depressivi (*Martin Giniset al.*, 2016). Studi dimostrano che l'attività fisica regolare stimola il rilascio di endorfine e neurotrasmettitori come la serotonina, migliorando l'umore e riducendo i sintomi depressivi (*Caspersen et al.*, 1985). Inoltre, lo sport offre obiettivi concreti e sfide personali, aumentando la motivazione e il senso di realizzazione (*Shapiro & Martin*, 2010). Per le persone con disabilità, questi effetti sono particolarmente significativi, poiché lo sport diventa uno strumento di *empowerment*, aiutandole a superare limiti percepiti e a costruire una identità positiva (*Taub et al.*, 1999). Durante l'attività sportiva, il monitoraggio delle condizioni di salute dell'atleta con disabilità e di altri parametri rilevati da sensori indossabili – in grado di riconoscere specifici

gesti motori associati al rischio di infortuni – può essere realizzato tramite un'*app* per *smartphone* o *tablet*. Questa tecnologia potrebbe fornire all'utente indicazioni per evitare situazioni di rischio, proteggendo la sua salute, e allo stesso tempo stimolandolo in modo ottimale al miglioramento della *performance* sportiva, nel rispetto delle sue potenzialità atletiche e della prevenzione di infortuni specifici per lo sport praticato.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

Benché esistano soluzioni tecnologiche legate a singoli ausili per disabili come protesi per specifiche attività sportive ottimizzate per ridurre rischi di lesioni da sovraccarico, sedie a rotelle con specifici accorgimenti come rinforzi o sistemi di ammortizzazione, tute protettive o sensori per misurare l'affaticamento, tuttavia non esistono tecnologie legate alla prevenzione di gesti motori errati che possono indurre lesioni in relazione allo sport praticato. Inoltre l'uso di sensori indossabili commerciali per monitorare l'affaticamento negli atleti disabili presenta alcune limitazioni, poiché

questi dispositivi sono spesso progettati e calibrati per atleti normodotati. Diversi studi (**Mason et al. (2020)** **Smith et al. (2019)** **Borghese et al. (2018)**) hanno evidenziato che i parametri fisiologici e biomeccanici degli atleti disabili possono differire significativamente, rendendo necessaria una personalizzazione dei dati raccolti. Il progetto WAVE si prefigge di superare queste limitazioni attraverso una rete di sensori indossabili e un algoritmo *custom* di analisi dati applicabile alla pratica sportiva del tiro con l'arco e *pararowing*.

METODOLOGIA

Nella prima fase del progetto sono state studiate in modo approfondito le soluzioni già disponibili per il monitoraggio del gesto atletico dell'atleta disabile, al fine di valutare l'applicabilità di tali soluzioni al contesto specifico del progetto WAVE. In esito allo studio effettuato è stato redatto e poi pubblicato l'articolo allegato intitolato *Wearable Sensors in Sports for Persons with Disability: A Systematic Review* che fornisce una esauriente panoramica delle applicazioni dei sensori indossabili nel mondo dello sport per persone con disabilità. Ciò che emerge è, tuttavia, che il numero di lavori scientifici pubblicati è estremamente limitato e che la variabilità che caratterizza gli atleti con disabilità rende particolarmente complicata la definizione di protocolli sperimentali generali. A valle del lavoro di revisione, quindi, appare evidente come uno degli obiettivi del progetto debba essere lo sviluppo di sistemi flessibili e modulabili a seconda non solo della disciplina sportiva di interesse, ma anche delle esigenze del singolo atleta. L'indagine della letteratura, relativamente agli atleti con disabilità, non ha evidenziato soluzioni preesistenti basate su sensori indossabili che coinvolgessero algoritmi automatici per il riconoscimento di gesti sportivi o per la loro segmentazione in fasi. In WAVE i metodi automatici di classificazione potranno invece trovare applicazione nel riconoscimento automatico di gesti tecnici che espongono l'atleta ad un aumentato rischio di infortunio o che si discostano dalla

corretta esecuzione del gesto stesso. Infine, non sono nemmeno emerse soluzioni tecnologiche specifiche per atleti con disabilità che abbiano l'obiettivo di aumentare l'adesione alla pratica sportiva. La definizione del *target* di studio è stata conseguita attraverso alcuni incontri con il Centro Veterani della Difesa, dove è stata presa in esame la numerosità degli atleti disponibili nell'ambito dei militari Veterani e le relative discipline sportive praticate. Le discipline selezionate sono state il tiro con l'arco ed il canottaggio. A valle della revisione sistematica della letteratura e del *focus group* con il tecnico di *para-archery* individuato, è stato possibile identificare una lista di parametri la cui misura/stima è stata considerata necessaria nel contesto del progetto WAVE. Tale lista è riportata in Tabella 1.

Al fine di poter quantificare (o successivamente stimare) tali parametri, è stato stabilito che il protocollo di misura comprendesse l'utilizzo delle seguenti strumentazioni: sensoristica indossabile (*Magnetic Inertial Measurement Units* - IMUs), elettromiografia di superficie (EMG) e sistema stereofotogrammetrico, considerato il sistema di riferimento per la misura della posa 3D dei segmenti corporei. È stato inoltre previsto l'utilizzo di una fascia toracica per la misura dell'elettrocardiogramma a singola derivazione. Il numero di IMU e sonde EMG e il rispettivo posizionamento sull'atleta è illustrato in Figura 1 e descritto in dettaglio in Tabella 2.

Analogamente a quanto avvenuto per il tiro con l'arco, a valle della revisione della letteratura e dei *focus group* organizzati con due tecnici di canottaggio e *para-rowing*, è stato definito anche il protocollo sperimentale per i test sul canottaggio che saranno svolti con atleti normodotati e con disabilità.

Il protocollo prevede l'utilizzo delle seguenti strumentazioni: sensoristica indossabile (*Magnetic Inertial Measurement Units* - IMUs e cardiofrequenzimetro), elettromiografia di superficie (EMG) e sistema stereofotogrammetrico. Il numero di IMU e sonde EMG e il rispettivo posizionamento sull'atleta è descritto in dettaglio in Tabella 3 e Figura 2. L'obiettivo di questa attività, conclusiva della Fase

SINTESI			
PARAMETRI	LETTERATURA	CRITICITÀ	MISURA
Tremore e oscillazioni	Marker sulla scapola e sull'omero (distale), componenti dell'accelerazione IMU su mano/braccio IMU sull'arco Marker sull'arco	Non indossabile Il movimento dell'arco dipende dalla tipologia di arco (olimpico, compost) Extra peso	Quantificazione tremore/oscillazioni: In quale fase del tiro? È correlato alla durata della fase? È associato alla fatica?
Oscillazione posturale	Piattaforme di forza IMU sulla pelvi	Complessa analisi pelvi nell'atleta in sedia a rotelle. Alternative: - IMU sul tronco - Seduta sensorizzata	Stima dell'equilibrio Ampiezza e direzione delle oscillazioni
Tempi/fasi	EMG Videocamera IMU sulle mani		Durata delle fasi Variabilità intra-soggetto
Frequenza cardiaca e respiratoria	Monitor frequenza cardiaca	Spirometria, quanto sono correlati i parametri respiratori?	Frequenza cardiaca e sua variabilità
Attività muscolare	EMG	Ogni atleta sviluppa una strategia personale, in funzione della disabilità	RMS
Distribuzione della forza di presa	FSR	Necessario strumentare l'arco	Forza di presa
Tempo di reazione al <i>clicker</i>	Microfono Interruttore meccanico	Implementazione indossabile	Tempo di reazione

Tabella 1 - Elenco delle grandezze da monitorare durante la pratica sportiva di *para-archery* per gli obiettivi del progetto WAVE.

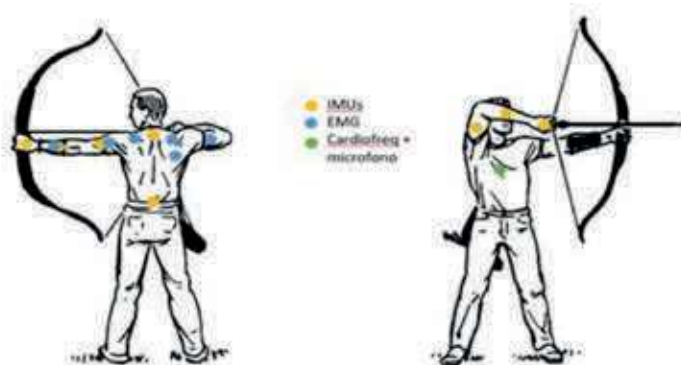


Figura 1 - Posizionamento della sensoristica indossabile per la pratica sportiva del *para-archery*.

Sensori	N.	Posizionamento
IMUs (sensori inerziali)	8+1	Mano, avambraccio, braccio (entrambi arti) Tronco (a livello dello sterno) Pelvi (L4-L5) Testa
EMG	8	Braccio che tende la corda Bicipite, trapezio superiore, deltoide posteriore (tricipite, romboide) Braccio che sostiene l'arco: trapezio superiore e deltoide mediale
Elettrocardiografia a singola derivazione	1	Fascia al torace
Stereofotogrammetria	39 markers	Modello <i>PLUG IN GATE</i>

Tabella 2 - Definizione delle grandezze da acquisire per la pratica sportiva del *archery*.

Sensori	N.	Posizionamento
IMUs (sensori inerziali)	9	Mano, avambraccio, braccio (entrambi arti) Tronco (a livello dello sterno) Pelvi (L4-L5) Testa
EMG	8	Entrambe le braccia: bicipite, trapezio superiore, deltoide posteriore (tricipite, romboide), pettorale
Elettrocardiografia a singola derivazione	1	Fascia al torace
Stereofotogrammetria	15 markers	Tronco e arto superiore

Tabella 3 - Definizione delle grandezze da acquisire per la pratica sportiva del *para-rowing*.



Figura 2 - Posizionamento della sensoristica indossabile per la pratica sportiva di *para-rowing*.

1, è stato quello di pianificare, progettare e sviluppare prove pilota di fattibilità che coinvolgessero le discipline e le strumentazioni oggetto del progetto su atleti normodotati e analizzarne i dati risultanti. Il risultato di questa attività ha consentito la messa a punto/in opera dei protocolli sperimentali e l'acquisizione di dati preliminari per l'implementazione degli algoritmi di analisi dati ed estrazione delle informazioni relative al monitoraggio del gesto tecnico, all'ottimizzazione della prestazione e al monitoraggio del rischio di infortunio. Le prove pilota sono svolte presso il laboratorio di analisi del movimento del CVD.

Sulla disciplina di tiro con l'arco, l'analisi dei dati si è concentrata sull'identificazione del momento di inizio e di fine di ogni tiro e sulle diverse fasi del gesto tecnico in esame. In particolare sono state individuate quattro fasi (per ogni tipologia di prova):

- Sollevamento arco (o fase di *set-up*): quando l'arco viene sollevato la spalla del braccio che regge la freccia (già incoccata) compie un movimento flessorio, mentre il gomito inizia il movimento di supinazione.
- Fase di *Drawing* (o fase di *draw*): la fase di *drawing* è resa evidente dal movimento di abduzione della spalla. L'angolo passa da un valore negativo (inizia da una condizione di adduzione della spalla) a uno positivo.
- Fase di Mira (o fase di *aiming*): in questo momento tutti gli angoli articolari sono pressoché costanti. L'arciere è fermo per valutare l'orientamento di arco e freccia.
- Rilascio e *Follow-Through* (o semplicemente fase di *follow-through*): appena la freccia viene



Figura 3 - Tiro con l'arco - Fase di calibrazione strumentale.



Figura 4 - Tiro con l'arco - Acquisizione stereofotogrammetrica del gesto sportivo.

rilasciata, la spalla compie un ulteriore movimento di adduzione e di rotazione esterna. La fase di *follow-through* è determinata dagli angoli articolari costanti: l'arciere si ferma un momento prima di rilassare la posizione e concludere il tiro.

L'identificazione di queste fasi sarà basata su specifiche caratteristiche dei segnali misurati, a seconda della strumentazione utilizzata. Il confronto di tali caratteristiche e la valutazione dell'accuratezza nell'identificazione delle fasi unicamente mediante sensori indossabili sarà oggetto delle attività della Fase 2 del progetto WAVE.

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

Una tecnologia indossabile progettata specificamente per atleti disabili potrebbe avere numerosi utilizzi e ricadute applicative, sia in termini di prevenzione degli infortuni che di supporto motivazionale. Ecco alcuni potenziali benefici e applicazioni:

a. Prevenzione degli infortuni

- **Monitoraggio biomeccanico in tempo reale:** Sensori integrati potrebbero analizzare movimenti specifici (es. spinta della carrozzina, gesto atletico) per identificare *pattern* potenzialmente dannosi e suggerire correzioni, riducendo il rischio di lesioni da sovraccarico o movimenti scorretti.

- **Allerta precoce per affaticamento:** Dispositivi potrebbero rilevare segnali di affaticamento muscolare o stress articolare, permettendo agli atleti di regolare l'intensità dell'allenamento e prevenire infortuni.

- **Protezione personalizzata:** Sensori potrebbero attivare sistemi di protezione (es. imbottiture intelligenti) in caso di movimenti bruschi o cadute, specialmente in sport ad alto impatto come lo sci o il basket in carrozzina.

b. Supporto motivazionale

- **Feedback immediato e personalizzato:** Fornire dati in tempo reale su progressi, prestazioni e obiettivi raggiunti può aumentare la motivazione e l'autoefficacia degli atleti.

- **Gamification:** Integrare elementi di gioco (es. premi virtuali, sfide) basati sui dati raccolti può rendere l'allenamento più coinvolgente e divertente.

- **Connessione con coach e team:** Tecnologie indossabili potrebbero condividere dati con allenatori e fisioterapisti, creando un sistema di supporto continuo e personalizzato.

c. Ottimizzazione delle prestazioni

- **Analisi dei dati storici:** I dispositivi potrebbero memorizzare dati sulle prestazioni passate, aiutando atleti e tecnici a identificare aree di miglioramento e pianificare allenamenti più efficaci.

- **Adattamento alle specifiche disabilità:** Tecnologie calibrate per disabilità specifiche (es. amputazioni, paraplegia) potrebbero fornire indicazioni su come massimizzare l'efficienza atletica senza compromettere la sicurezza.

d. Inclusione e partecipazione

- **Accessibilità per tutti i livelli:** Dispositivi semplici da usare potrebbero essere adottati sia da atleti professionisti che da amatori, promuovendo una maggiore partecipazione allo sport.

- **Sensibilizzazione e consapevolezza:** L'uso di queste tecnologie potrebbe aumentare la visibilità delle esigenze de-

gli atleti disabili, spingendo verso ulteriori innovazioni e politiche inclusive.

e. Ricadute sociali ed economiche

- **Riduzione dei costi sanitari:** Prevenire infortuni significa ridurre le spese mediche e riabilitative, con benefici per atleti e sistemi sanitari.
- **Promozione dello sport paralimpico:** Tecnologie avanzate potrebbero attrarre più investimenti e sponsorizzazioni, contribuendo alla crescita dello sport paralimpico.

progetto del protocollo sperimentale, l'individuazione della sensoristica e i test preliminari, attività che sono state concluse a febbraio 2021. Nella Fase 2, il cui avvio contrattuale dovrebbe concretizzarsi a metà 2025, sono previste lo sviluppo di metodologie computazionali avanzate e l'implementazione preliminare della soluzione. Nello specifico, in questa seconda fase del progetto, si proseguirà con lo sviluppo delle metodologie computazionali avanzate (iniziato in fase 1) per l'estrazione degli indicatori di prestazione e dei fattori di rischio per le discipline sportive selezionate (tiro con l'arco e canottaggio). Verranno inoltre integrate le diverse componenti della soluzione *hardware+software* implementando le sue funzioni chiave ed effettuando una prima fase di test.

CONCLUSIONI

Il progetto WAVE Fase 1 ha previsto l'Analisi dello stato dell'arte, la Definizione del *target* di studio, il

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

CVD	<i>Centro Veterani della Difesa</i>
EMG	<i>Electromyography</i>
IMU o MIMU	<i>Magnetic Inertial Measurement Units</i>
WAVE	<i>Wearable Assistant for VEterans in sport</i>

PAROLE CHIAVE

Sport Veterani, analisi movimento, valutazione prestazione, biomeccanica sport, sensori indossabili.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	a2018.101
Amministrazione appaltante:	COMMISERVIZI
Ente responsabile del progetto:	Istituto di Scienze Biomediche della Difesa
Città, Regione:	Roma, Lazio
Titolo e nome del responsabile del progetto:	CV Aldo Lazich
Recapiti del responsabile del progetto:	Via di Villa Fonseca, 6 00184 Roma (ITALY)
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	tel.mil. 2041437 - tel.civ. +39 06 469141437
E-mail del responsabile del progetto:	aldo.lazich@marina.difesa.it

BIBLIOGRAFIA

- Mason, B. S., van der Woude, L. V., & Goosey-Tolfrey, V. L. (2020). The ergonomics of wheelchair configuration for optimal performance in the wheelchair court sports. *Sports Medicine*.
- Borghese, N. A., et al. (2018). Wearable sensors for monitoring and preventing injuries in athletes with disabilities: Challenges and opportunities. *Sensors*.
- De Luigi, A. J. (2014). Adaptive sports medicine: A review of current technology and future trends. *PM&R Journal*.
- Smith, A. C., et al. (2019). Challenges in using wearable technology to monitor athletes with disabilities. *Journal of Sports Sciences*.
- Martin Ginis, K. A., et al. (2016). "Participation of people living with disabilities in physical activity: a global perspective." *The Lancet*.
- Caspersen, C. J., et al. (1985). "Physical activity, exercise, and physical fitness: definitions and distinctions for health-related research." *Public Health Reports*.
- Shapiro, D. R., & Martin, J. J. (2010). "Multidimensional physical self-concept of athletes with physical disabilities." *Adapted Physical Activity Quarterly*.
- Taub, D. E., et al. (1999). "Stigma management through participation in sport and physical activity: Experiences of male college students with physical disabilities." *Human Relations*.

Durante lo svolgimento di precedenti progetti PNRM (NIB1 e NIB2) è stato individuato un principio attivo (Ebselen) in grado di contrastare gli effetti della tossina botulinica nel modello animale. Il progetto SPES (Sintesi, Produzione dell'Ebselen e sua Sperimentazione) ha l'obiettivo di confermare l'efficacia dell'Ebselen nell'uomo, al fine di disporre di un farmaco, a scopo preventivo e/o terapeutico, in grado di eliminare o ridurre gli effetti della tossina botulinica. L'Ebselen, sintetizzato durante la fase 1/2 del progetto, è stato in grado di proteggere *in vitro*, colture primarie di granuli di cervelletto di topo dall'azione della tossina botulinica di tipo A, e *in vivo*, di ridurre la durata della paralisi indotta dalla tossina e riducendo del 50% la mortalità nei topi trattati con una dose letale della stessa. Inoltre, è stato confermato che il principio attivo non è tossico alle dosi somministrate. La fase due del progetto consisterà nella sperimentazione clinica di fase I nell'uomo. È importante sottolineare che se tale efficacia fosse dimostrata anche nell'uomo le forze armate, così come la sanità pubblica sarebbero dotate di un trattamento per il botulismo, come contromisura medica in caso di attacco bioterroristico o in caso di un focolaio epidemico.

INTRODUZIONE

Le neurotossine botuliniche (BoNTs) sono le sostanze più tossiche fino ad oggi conosciute e sono prodotte da batteri appartenenti al genere *Clostridium* (*C. argentinense*, *C. botulinum*, *C. baratii* e *C. butyricum*) [1]. BoNTs rappresentando l'agente eziologico del botulismo, una malattia rara ma letale se non rapidamente trattata. A causa della loro elevata letalità, della facilità di produzione, trasporto e disseminazione, le BoNTs vengono classificate dal *Center for Diseases Control and Prevention* (CDC) di Atlanta nella categoria A degli agenti biologici, indicando così il loro potenziale nell'uso deliberato in azioni terroristiche o scenari bellici [2-4]. Attualmente non esistono adeguate misure terapeutiche per contrastare gli effetti delle BoNTs e l'unica terapia disponibile, oltre a quella di supporto (ventilazione forzata), è di tipo post-espositivo, basata sulla somministrazione di antisieri specifici. Quest'ultimi però presentano alcune limitazioni quali il rischio di indurre reazioni di ipersensibilità individuale, lunghi tempi di preparazione dovuti alla produzione

di antisieri specifici (relativi al tipo di tossina implicata) e costi elevati.

Nel corso di precedenti progetti PNRM è stata individuata una piccola molecola, l'Ebselen, quale promettente agente terapeutico in grado di contrastare gli effetti della tossina botulinica nel modello animale [5-6]. Lo scopo del progetto SPES (Sintesi, Produzione dell'Ebselen e sua Sperimentazione) è quello di produrre tale principio attivo per uso umano - attualmente non disponibile sul mercato - ed iniziarne la sperimentazione clinica sull'uomo.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

Le tossine botuliniche causano una grave malattia neuromuscolare, il botulismo, caratterizzato da paralisi flaccida. A livello delle sinapsi colinergiche, le tossine attraversano la membrana plasmatica delle cellule nervose, e nel citoplasma inattivano una delle proteine del complesso SNARE (SNAP-25, Sintaptobrevina e Sintaxina) bloccando il rilascio del neurotrasmettitore acetil-colina (Figura 1) [7-

8]. La paralisi dura da alcune settimane ad alcuni mesi, rendendo necessario un costante monitoraggio delle funzioni vitali. In base alle loro proprietà sierologiche si distinguono 8 tipi di tossine (A-H), suddivise in più di 30 sottotipi (A1-8; B1-8; E1-12; ecc). Esse presentano una struttura conservata costituita da una catena pesante (100 kDA) e una catena leggera (50 kDA), legate da un ponte disolfuro che deve essere tagliato (ridotto) per attivare la tossina liberando la subunità catalitica [9]. Ad oggi non sono disponibili terapie mirate per la risoluzione del problema. Per tale motivo è importante disporre di un farmaco in grado di eliminare o ridurre gli effetti della tossina botulinica.

Studiando il meccanismo d'azione delle BoNTs è stata individuata una soluzione per bloccarne la tossicità, agendo direttamente sul complesso enzimatico cellulare Tioredossina Reduttasi-Tioredossina (TrxR- Trx) [10] con la

somministrazione di un inibitore: l'Ebselen (*2-Phenyl-1,2-benzisosselenazol-3(2H-one)*). Tale sostanza si è dimostrata in grado di inibire l'azione della neurotossina sia *in vitro* sulle cellule neuronali che *in vivo* nel modello animale. Se tale effetto fosse dimostrato anche nell'uomo, si disporrebbe di una innovazione dirompente che avrebbe il vantaggio di essere immediatamente disponibile. Infatti, il proprio meccanismo d'azione è indipendente dal sierotipo di tossina coinvolto. In tal modo, si eliminerebbero e/o ridurrebbero i lunghi tempi per identificare il tipo e il sottotipo di tossina per la produzione di antisieri specifici (con i noti effetti collaterali di ipersensibilità individuale), l'utilizzo di test *in vivo* sul topo (*mouse bioassay*) e i costi delle lunghe terapie di supporto.

METODOLOGIA

Il progetto SPES si articola in due fasi. La prima fase 1/2 prevede la produzione ed analisi dell'Ebselen rispettando le linee guida previste per la successiva produzione in *Good Manufacturing Practice* (GMP). Il prodotto di nuova sintesi è stato testato sul modello animale, e i risultati ottenuti sono stati comparati con quelli precedentemente conseguiti con l'Ebselen commercializzato (per studi preclinici, non sull'uomo). La seconda fase consisterà nell'effettuare la sperimentazione clinica di fase 1 in volontari sani. In caso di conferma dei dati ottenuti dalla sperimentazione sull'uomo si potrà procedere con le fasi successive dello studio clinico (fase 2-3) (Figura 2).

L'ottimizzazione del metodo di sintesi e la produzione del principio attivo (API - *active pharmaceutical ingredient*) è stata effettuata dalla ditta *Lundbeck Pharmaceuticals Italia* (LUPI). Per valutarne la qualità l'Ebselen di nuova sintesi è stato testato con Cromatografia Liquida Ultra *Performance* (UPLC) presso il laboratorio del Dipartimento di Scienze Farmaceutiche dell'Università di Padova. Il risultato della comparazione dei profili di qualità ha mostrato un maggior grado di purezza dell'Ebselen di nuova sintesi rispetto a quello utilizzato

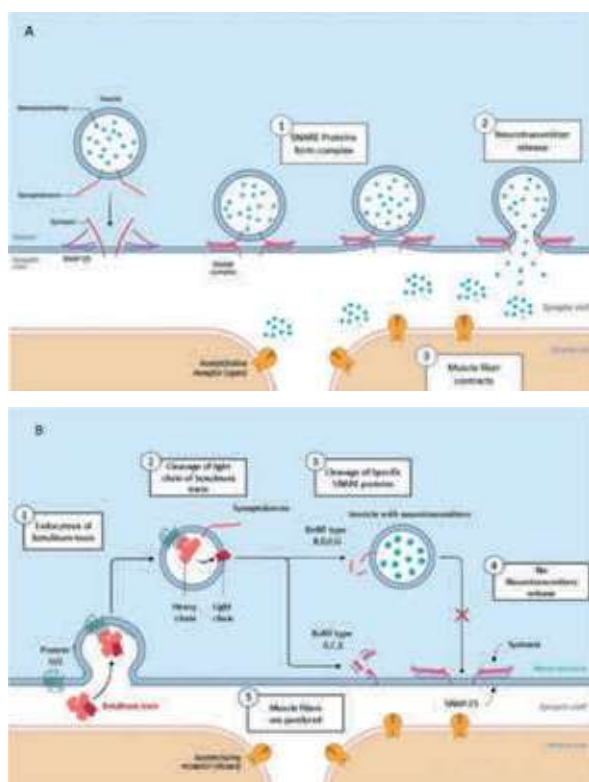


Figura 1 - Effetti della tossina botulinica tipo A (BoNT/A) in cellule neuronali. a) Normale funzione fisiologica della terminazione nervosa che libera il neurotrasmettitore acetilcolina durante l'impulso elettrico fondendosi (esocitosi) con la membrana presinaptica; b) Blocco dell'esocitosi dell'acetilcolina indotta dall'ingresso della tossina botulinica nel neurone (*created with BioRender.com*).

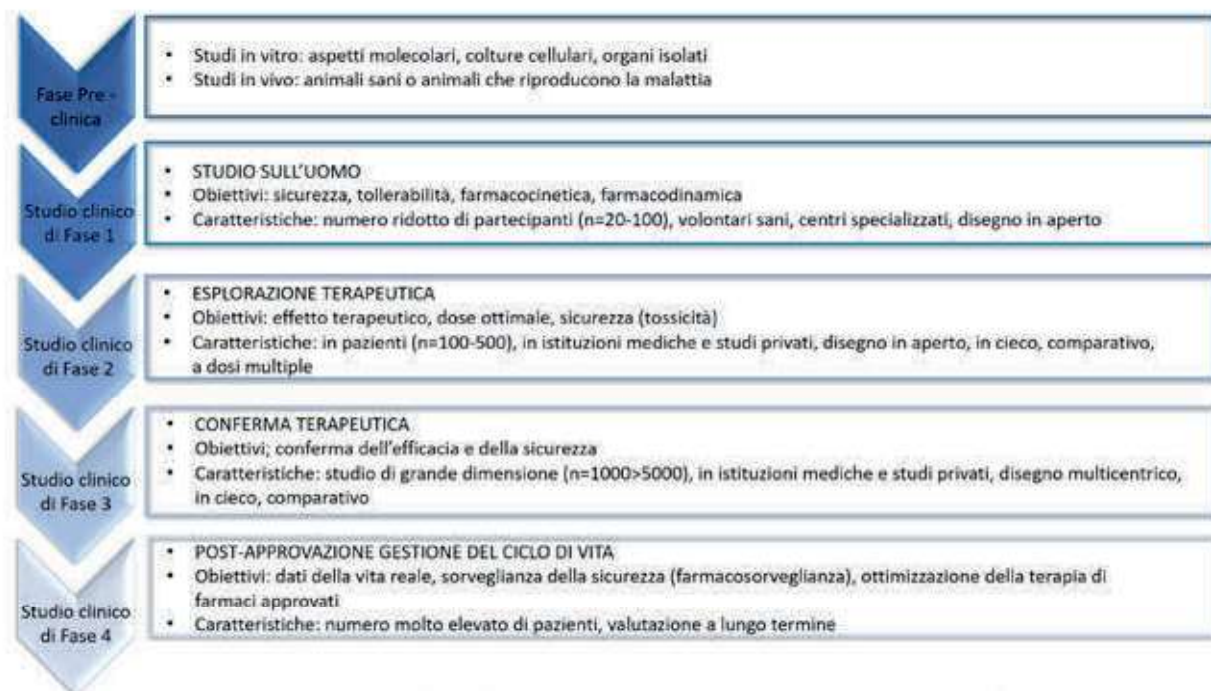


Figura 2 - Dettagli sulle fasi della Sperimentazione pre-clinica, clinica e post-marketing.

nei precedenti studi preclinici. Inoltre, studi *in vitro* su colture primarie di granuli di cervelletto hanno confermato l'efficacia dell'Ebselen neosintetizzato nel prevenire il taglio del complesso SNARE (SNAP25 e Sinaptobrevina) proteggendo così tali cellule dall'intossicazione con la tossina botulinica di tipo A e B (BoNT/A e /B).

Inoltre, è stata valutata tossicità del prodotto di neosintesi sia *in vitro* che *in vivo*. A questo scopo

un gruppo di 5 topi è stato trattato per 3 giorni con un'iniezione intraperitoneale di Ebselen o di Ebselen LUPI 7.5 mg/kg ogni 12 hr. I risultati ottenuti mostrano una sopravvivenza del 100% in entrambi i casi (Figura 3).

Inoltre, *in vivo* il principio attivo riduce la durata della paralisi indotta dalla tossina di tipo A e riduce del 50% la mortalità nei topi trattati con una dose letale della stessa tossina (Figura 4).

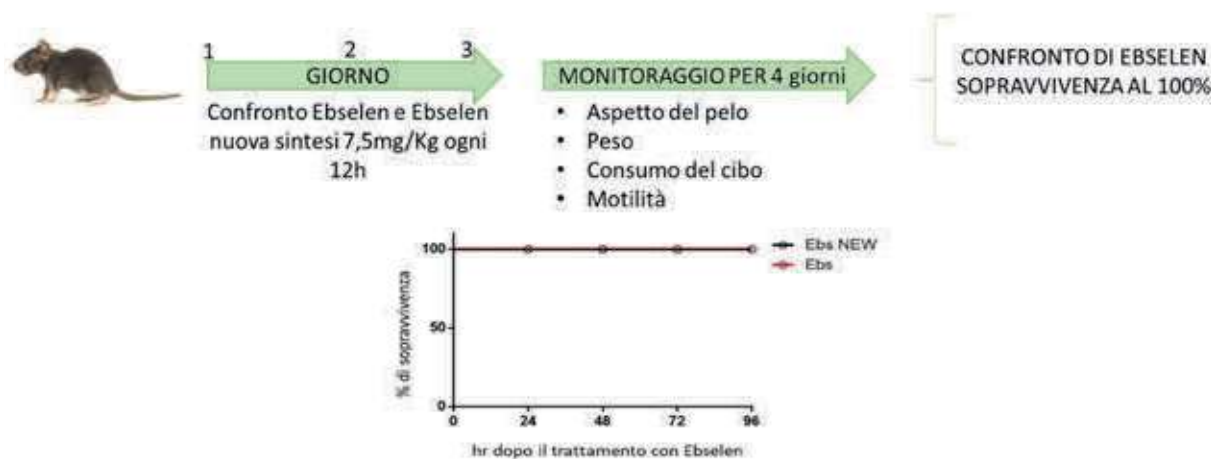


Figura 3 - Test di tossicità nei topi.

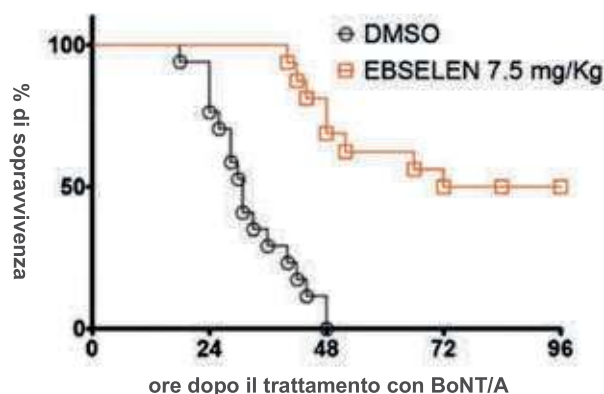


Figure 4 - L'ebselelen riduce la letalità del BoNT/A. Topi CD 1 maschi adulti pretrattati con 7,5 mg/kg di ebselen (n=15) o placebo (n=15) sono stati sottoposti a iniezione intraperitoneale di 2 x LD50 (dose letale) di BoNT/A. Gli animali sono stati monitorati ogni 4 ore per 96 ore.

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

Il progetto SPES si inquadra nelle attività di ricerca dell'Istituto di Scienze Biomediche della Difesa (ex Dipartimento Scientifico del Policlinico Militare), avviate con i progetti: "Caratterizzazione e individuazione dei batteri produttori della tossina botulinica", NIB1 e NIB2 che hanno portato a due brevetti dal titolo "Somministrazione a scopo preventivo o terapeutico di un inibitore del complesso enzimatico Tiodrossina reduttasi-Tiodrossina (TrxR-Trx) cellulare per bloccare l'attività della tossina botulinica e contrastarne gli effetti patogeni negli organismi viventi" (n. 102016000102615) e "Metodo analitico e kit per la determinazione *in vitro* delle neurotossine botuliniche in un campione" (n. 102020000022054). La conferma dell'attività inibitoria del composto sulle tossine botuliniche nell'uomo consentirà di dotare le forze armate di un trattamento preventivo per il botulismo. Il progetto SPES presenta una significativa valenza duale in quanto se da un lato annulla o riduce la minaccia di un potenziale uso bellico/terroristico della tossina botulinica, dall'altra offre una soluzione ad un rilevante problema di sanità pubblica, essendo l'Italia attualmente il primo paese in Europa per casi di botulismo [11].

L'aspetto economico si compone sia da un significativo abbattimento dei costi – inclusi quelli correlati alle terapie di supporto e antibiotiche e alla produzione di antisieri specifici - sia da una even-

tuale generazione di profitti attraverso la commercializzazione del farmaco e le *royalties*.

CONCLUSIONI

Lo studio sul meccanismo d'azione delle tossine botuliniche ha permesso di identificare nuove strategie per lo sviluppo di inibitori e antidoti più efficaci di quelli attualmente disponibili. L'individuazione dell'Ebselen come inibitore del sistema TrxR-Trx, ha permesso di sviluppare una nuova strategia terapeutica preventiva per il botulismo. L'Ebselen, o meglio il medicinale a base di Ebselen, avrà il vantaggio di essere somministrato a scopo preventivo, essendo prontamente disponibile, in quanto il suo meccanismo d'azione è indipendente dal sierotipo della tossina botulinica coinvolta. Quindi non sarà più richiesta l'identificazione del sierotipo ad oggi necessaria per la produzione di antisieri specifici né l'utilizzo di test *in vivo* sul topo (*mouse bioassay*). Inoltre, verrebbero eliminati e/o ridotti i costi delle lunghe terapie di supporto e le reazioni individuali di ipersensibilità.

Infine, SPES ha una valenza duale in quanto l'Ebselen impedirà o ridurrà la minaccia di un potenziale uso bellico/terroristico della tossina botulinica, ma offrirà anche la possibilità di trattamento terapeutico pre-esposizione del botulismo nelle sue varie forme cliniche (cibo, ferite, iatrogena, inalatoria, infettiva), offrendo una soluzione ad un problema di salute pubblica ancora particolarmente sentito in alcune regioni italiane.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

SPES	<i>Sintesi, Produzione dell'Ebselen e sua Sperimentazione</i>
NIB	<i>Nuovi Inibitori del Botulismo</i>
BoNTs	<i>NeuroTossine Botuliniche</i>
SNARE	<i>Recettori per le proteine SNAP-25</i>
SNAP-25	<i>Proteine associate ai sinaptosomi</i>
BoNT/A e /B	<i>Tossina botulinica tipo A e B</i>
CGNs	<i>Colture primarie di granuli di cervelletto</i>
TrxR-Trx	<i>Tioredossina Reduttasi -Tioredossina</i>
PNRM	<i>Piano Nazionale della Ricerca Scientifica</i>
CDC	<i>Center for Diseases Control and Prevention</i>
LUPI	<i>Lundbeck Pharmaceuticals Italia</i>
UPLC	<i>Cromatografia Liquida Ultra Performance</i>

PAROLE CHIAVE

Neurotossine botuliniche, Tioredossina Reduttasi-Tioredossina, inibitore, Ebselen, botulismo, sperimentazione clinica.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	a2020.CT010
Amministrazione appaltante:	Direzione Generale di Commissariato e dei Servizi Generali (COMMISERVIZI)
Ente responsabile del progetto:	Istituto di Scienze Biomediche della Difesa (ex Dipartimento Scientifico - Policlinico Militare di Roma)
Città, Regione:	Roma, Lazio
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Brig. Gen. Florigio Lista
Recapiti del responsabile del progetto:	Via S. Stefano Rotondo, 4 - 00184 Roma
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	+39 06 461914400
E-mail del responsabile del progetto:	florigio.lista@esercito.difesa.it - direttore@isbd.difesa.it

BIBLIOGRAFIA

1. Rossetto O, Pirazzini M, Montecucco C. Botulinum neurotoxins: genetic, structural and mechanistic insights. *Nat Rev Microbiol.* 2014 Aug 12; 12:535-549.
2. Rao AK, Sobel J, Chatham-Stephens K, Luquez C. Centers for Disease Control and Prevention Recommendations and Reports. *Morb. Mort. Weekly Rep.* 2021; 70:1-29.

3. Centers for Disease Control and Prevention, Department of Health and Human Services. Possession, use, and transfer of select agents and toxins: biennial review. Final rule. Fed. Regist. 2012 Oct 5; 77, 61083–61115.
4. Arnon SS, Schechter R, Inglesby TV, Henderson DA, Bartlett JG, Ascher MS, Eitzen E, Fine AD, Hauer J, Layton M, Lillibridge S, Osterholm MT, O’Toole T, Parker G, Perl TM, Russell PK, Swerdlow DL, & Tonat K. Botulinum toxin as a biological weapon: Medical and public health management. 2001 Feb 28; 285(8), 1059-1070.
5. Singh N, Halliday AC, Thomas JM, Kuznetsova OV, Baldwin R, Woon EC, Aley PK, Antoniadou I, Sharp T, Vasudevan SR, Churchill GC. A safe lithium mimetic for bipolar disorder. Nat Commun. 2013;4:1332. doi: 10.1038/ncomms2320. PMID: 23299882; PMCID: PMC3605789.
6. Masaki C, Sharpley AL, Cooper CM, Godlewska BR, Singh N, Vasudevan SR, Harmer CJ, Churchill GC, Sharp T, Rogers RD, Cowen PJ. Effects of the potential lithium-mimetic, ebselen, on impulsivity and emotional processing. *Psychopharmacology* (2016) 233:1097-1104.
7. Chimienti S, Di Spirito M, Molinari F, Rozov O, Lista F, D’Amelio R, Salemi S, Fillo S. Botulinum Neurotoxins as Two-Faced Janus Proteins. *Biomedicines*. 2025 Feb 8;13(2):411. doi: 10.3390/biomedicines13020411. PMID: 40002825; PMCID: PMC11853235.
8. Zanetti G, Azarnia Tehran D, Pirazzini M, Binz T, Shone CC, Fillo S, Lista F, Rossetto O, Montecucco C. Inhibition of botulinum neurotoxins interchain disulfide bond reduction prevents the peripheral neuroparalysis of botulism. *Biochem Pharmacol*. 2015 Dec 1;98(3):522-30.
9. Swaminathan S. Molecular structures and functional relationships in clostridial neurotoxins. *The FEBS Journal*. 2011 Dec; 278: 4467-4485.
10. Pirazzini M, Azarnia Tehran D, Zanetti G, Megighian A, Scorzeto M, Fillo S, Shone CC, Binz T, Rossetto O, Lista F, Montecucco C. Thioredoxin and its reductase are present on synaptic vesicles, and their inhibition prevents the paralysis induced by botulinum neurotoxins. *Cell Rep*. 2014 Sep 25;8(6):1870-1878.
11. European Centre for Disease Prevention and Control. Botulism. In: ECDC. Annual Epidemiological Report for 2021. Stockholm: ECDC; 2024. <https://www.ecdc.europa.eu/en/publications-data/botulism-annual-epidemiological-report-2022>.

L'impiego delle radiazioni elettromagnetiche non ionizzanti ha avuto negli ultimi anni una grande espansione sia in ambito militare che civile. Di conseguenza grande interesse della ricerca è rivolto agli effetti biologici associati all'esposizione a queste radiazioni. Nei precedenti progetti PNRM finanziati denominati GREAM e GREAM 2 è stato valutato il danno citotossico e genotossico in cellule umane esposte *in vitro* a radiazioni elettromagnetiche utilizzate nelle applicazioni militari. Il presente studio si focalizza invece su una popolazione di militari che lavora in ambienti dove sono presenti sorgenti di RF e si articola in due parti: a) identificazione e caratterizzazione delle condizioni di esposizione mediante simulazione computazionale; b) valutazione di possibili effetti biologici in un gruppo di militari professionalmente esposti a RF e in un gruppo di controllo costituito da militari "non esposti", mediante un approccio multimetodologico già utilizzato nei due precedenti progetti PNRM. Nella Fase 1 del progetto è stata individuata la sorgente potenzialmente più critica dal punto di vista espositivo, ne sono state definite le caratteristiche ed è stata eseguita una prima quantificazione dei livelli espositivi. Inoltre, sono state effettuate le analisi biologiche su militari "non esposti". Vengono riportati i risultati preliminari.

INTRODUZIONE

Le radiazioni del campo elettromagnetico (CEM), in particolare le radiofrequenze (RF), trovano sempre più applicazione in ambito militare, determinando una crescente esposizione del personale. Gli unici effetti biologici delle RF, noti e condivisi dalla comunità scientifica, sono quelli termici e, sebbene siano stati condotti numerosi studi in merito a quelli non termici, a tutt'oggi questo argomento resta controverso e dibattuto. Inoltre, detti studi sono prevalentemente *in vitro*, mentre quelli di monitoraggio biologico su gruppi di individui esposti per motivi professionali sono pochi. L'obiettivo specifico di questo progetto è quello di trasferire le conoscenze acquisite nelle nostre precedenti ricerche *in vitro* ad uno studio di un gruppo di militari esposti professionalmente a RF con l'obiettivo finale di salvaguardare la salute del personale che lavora in presenza di queste sorgenti. L'aspetto innovativo è che per la prima volta

viene caratterizzata l'esposizione del personale militare mediante l'utilizzo di modelli umani anatomici e piattaforme di calcolo computazionale. Un ulteriore approccio innovativo di questa ricerca riguarda l'analisi del trascrittoma mediante tecnologia NGS (*Next Generation Sequencing*) per l'identificazione di geni "sensibili" a queste radiazioni. Lo studio potrebbe contribuire alla revisione delle normative in vigore sull'esposizione professionale, dei protocolli sanitari e di sicurezza di militari e civili.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

Negli ultimi anni, grazie al rapido sviluppo tecnologico, si è assistito in campo militare ad un crescente impiego di apparecchi e sistemi che utilizzano radiazioni del CEM, in particolare RF. Radar, microonde tattiche, jammer, sistemi di comunicazione satellitare e altri dispositivi basati su questo tipo di radiazioni rivestono un

ruolo di rilievo nelle moderne operazioni militari. Inoltre, recentemente un ulteriore utilizzo di RF è richiesto per supportare tecnologie come droni e sistemi a distanza. Questo ampio numero di applicazioni militari delle RF rende urgente la valutazione dei potenziali rischi per la salute dei militari professionalmente esposti. Sebbene esistano una regolamentazione nazionale sui limiti di esposizione professionale ai CEM, che recepisce le raccomandazioni europee, e delle linee guida internazionali (ICNIRP), queste fanno riferimento quasi esclusivamente agli effetti termici, scientificamente ben documentati. Inoltre, il contributo degli studi di biomonitoraggio di individui professionalmente esposti alle RF alle suddette normative e linee guida risulta scarso, in quanto, dalla revisione della letteratura risultano di numero esiguo. L'intento del progetto GREAM 3 è quello di implementare le ricerche intraprese con il progetto GREAM e GREAM 2 su cellule umane, con uno studio sui militari che svolgono la loro attività utilizzando dispositivi a RF o in presenza di apparecchi che emettono RF, mediante un duplice approccio: "ingegneristico" con la caratterizzazione delle condizioni di esposizione, mimando scenari realistici, e "biologico" con la valutazione di eventuali effetti genotossici e/o citotossici sui soggetti che partecipano allo studio.

METODOLOGIA

A) Caratterizzazione dell'esposizione

È stato selezionato il modello "umano" in silico 3D, il modello di sorgente CEM e la posizione relativa tra sorgente e modello umano. Lo scenario espositivo è poi stato simulato con una piattaforma di calcolo computazionale (Figura 1). Infine sono stati valutati i livelli di potenza elettromagnetica assorbita per unità di massa (*Specific Absorption Rate* – SAR (W/kg) del modello umano. Il massimo valore è risultato 1,204 W/kg per W di potenza in ingresso all'antenna della sorgente.

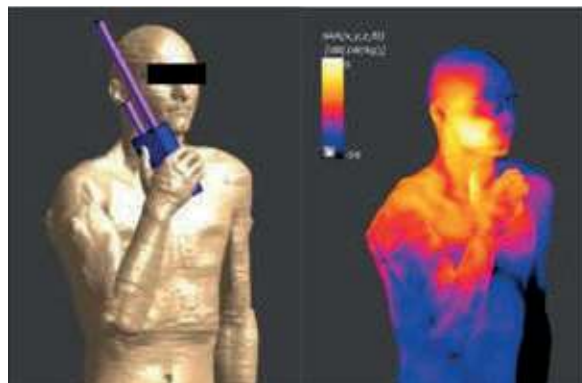


Figura 1 - Esempio di distribuzione di SAR (W/kg), normalizzata a 1 W di potenza in ingresso all'antenna, generata da una radio SDR-HH (Software Defined Radio hand-held)* su un modello 3D umano.

*Selezionata tra le sorgenti CEM individuate quali potenzialmente più critiche dal punto di vista espositivo, in termini di vicinanza al corpo, tempistiche, frequenza di utilizzo e dose di potenza elettromagnetica assorbita dai tessuti umani.

B) Analisi Biologiche

Definiti i criteri di inclusione nello studio, si è proceduto all'esame di 12 militari "non esposti". Su campioni di sangue periferico di questi individui sono stati valutati differenti marcatori biologici, gli stessi utilizzati nei precedenti progetti *in vitro* (Figura 2). È stata effettuata l'analisi dei

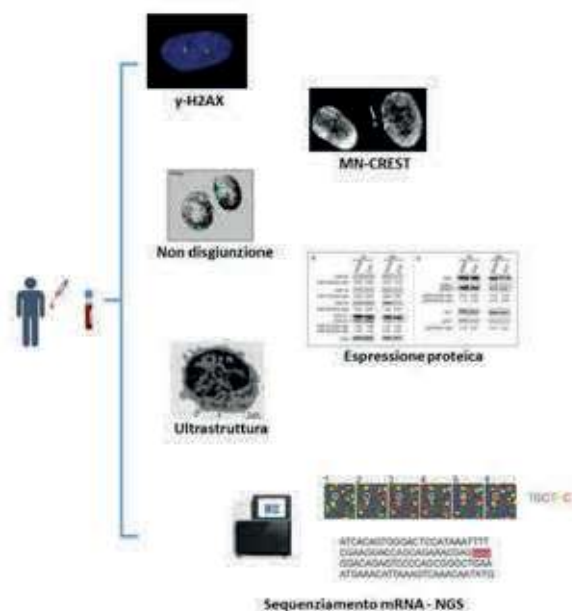


Figura 2 - Analisi biologiche effettuate da campioni di sangue periferico.

foci gamma H2AX per rilevare eventuali rotture a doppio filamento del DNA. Il Test dei micronuclei (MN) in cellule binucleate con colorazione in fluorescenza CREST è stato eseguito per valutare un

possibile danno cromosomico e la sua natura, perdita di cromosoma intero o formazione di frammento acentrico. Inoltre, per individuare eventi di malsegregazione è stata effettuata l'analisi della non-disgiunzione cromosomica in cellule binucleate mediante tecnica FISH (*Fluorescence In Situ Hybridization*) con sonde centromeriche specifiche per 3 coppie di cromosomi. I valori ottenuti dalle suddette indagini sono risultati in accordo con quelli riportati in letteratura nella popolazione non esposta. È stata inoltre condotta l'analisi dell'espressione di alcune proteine dello shock termico e di proteine coinvolte nella trasduzione del segnale che ha rivelato una eterogeneità di espressione nei campioni esaminati. L'analisi ultrastrutturale eseguita mediante microscopia elettronica di cellule linfocitarie ha mostrato una morfologia ben conservata e nei limiti della norma. Infine, il sequenziamento dell'mRNA su linfociti ha fornito sequenze idonee alla successiva analisi bioinformatica per lo studio dei profili di espressione genica.

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

I risultati ottenuti da questa ricerca potrebbero determinare un avanzamento della conoscenza scientifica sugli effetti biologici delle RF. Lo studio potrebbe inoltre contribuire alla revisione delle attuali normative in vigore sull'esposizione professionale, anche con un possibile ampliamento dei protocolli sanitari e delle linee guida per la tutela della salute

e della sicurezza dei militari e dei civili che svolgono la propria attività professionale in presenza di dispositivi che emettono tali radiazioni.

CONCLUSIONI

Nella Fase 1 di 2 del progetto GREAM 3 è stata individuata e caratterizzata la sorgente potenzialmente più critica dal punto di vista espositivo e definito lo scenario espositivo. Sono stati quindi calcolati i livelli di SAR dei tessuti del modello umano. Il valore massimo di potenza in ingresso all'antenna ottenuto, verrà confrontato nella Fase 2 con quelli riportati nelle linee guida per la protezione dell'esposizione umana ai CEM. Verrà, inoltre, quantificata la variabilità dell'esposizione al variare dei parametri di simulazione. Nella fase 1 i risultati ottenuti dalle molteplici indagini biologiche nei primi militari "non esposti" reclutati sono in accordo con quelli osservati in popolazioni non esposte. È stata, inoltre, evidenziata una eterogeneità di espressione delle proteine dello shock termico e di alcune proteine della trasduzione del segnale saggiate nei soggetti analizzati.

Nella fase successiva del progetto saranno esaminati ulteriori militari del gruppo di controllo ed i militari "esposti" del gruppo di studio. I risultati ottenuti nei due gruppi saranno infine sottoposti ad analisi comparativa. I dati del sequenziamento dell'mRNA verranno elaborati mediante analisi bioinformatica per l'identificazione di eventuali geni differenzialmente espressi e della loro funzione, se nota, così da avere informazioni sui processi coinvolti nella risposta biologica alle RF.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

CEM	<i>Campo elettromagnetico</i>
RF	<i>Radiofrequenze</i>
NGS	<i>Next Generation Sequencing</i>
CREST	<i>Calcinosi, fenomeno di Raynaud, esofagopatia, sclerodattilia, teleangectasie</i>
SAR	<i>Specific Absorption Rate</i>
ICNIRP	<i>International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection</i>

PAROLE CHIAVE

Campo elettromagnetico, radiofrequenze, biomonitoraggio, esposizione professionale, analisi computazionale, analisi biologiche, sequenziamento mRNA.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	A2018.055
Amministrazione appaltante:	Direzione Generale di Commissariato e di Servizi Generali (COMMISERVIZI)
Ente responsabile del progetto:	Istituto di Scienze Biomediche della Difesa (ISBD)
Città, Regione:	Roma, Lazio
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Magg. sa. (me) Filippo Molinari
Recapiti del responsabile del progetto:	Via Santo Stefano Rotondo 4, 00184 Roma
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	+39 06 469141440
E-mail del responsabile del progetto:	filippo.molinari@esercio.difesa.it

BIBLIOGRAFIA

Bourthoumieu S, Terro F, Leveque P, Collin A, Joubert V, Yardin C. Aneuploidy studies in human cells exposed in vitro to GSM-900 MHz radiofrequency radiation using FISH. *Int. J. Radiat. Biol.* 2011; 87,400–408.

Fenech M, Morley AA. Measurement of micronuclei in lymphocytes. *Mutat. Res.* 1985; 247:29–36.

Franchini V, Regalbuto E, De Amicis A, De Sanctis S, Di Cristofaro S, Coluzzi E, Marinaccio J, Sgura A, Ceccuzzi S, Doria A, et al. Genotoxic Effects In Human Fibroblasts Exposed To Microwave Radiation. *Health Phys.* 2018; 115:126–139.

ICNIRP 2020. “Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz). *Health Physics.* 2020; 118 (5): 483–524.

Marjanović AM, Pavičić I, Trošić I. Biological Indicators in Response to Radiofrequency/Microwave Exposure. *Arhiv Za Higijenu Rada i Toksikologiju.* 2012; 63(3):407–16.

Miyakoshi J. Cellular and Molecular Responses to Radio-Frequency Electromagnetic Fields. *Proceedings of the IEEE* 2013; 101 (6): 1494–1502.

Massaro L, De Sanctis S, Franchini V, Regalbuto E, Alfano G, Focaccetti C, Benvenuto M, et al. Study of Genotoxic and Cytotoxic Effects Induced in Human Fibroblasts by Exposure to Pulsed and Continuous 1.6 GHz Radiofrequency. *Frontiers in Public Health* 2024(July); 1419525.

Regalbuto E, Anselmo A, De Sanctis S, Franchini V, Lista F, Benvenuto M, Bei R, et al. Human Fibroblasts In Vitro Exposed to 2.45 GHz Continuous and Pulsed Wave Signals: Evaluation of Biological Effects with a Multimethodological Approach. *International Journal of Molecular Sciences.* 2020; 21(19):7069.

Simko M, Mattsson M. 5G Wireless Communication and Health Effects — A Pragmatic Review Based on Available Studies Regarding 6 to 100 GHz. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2019; 16(18):3406.

Vershaeve L. Genetic effects of radiofrequency radiation (RFR). *Toxicology and Applied Pharmacology*. 2005; 207: 336 – 341.

Vijayalaxmi, Scarfi MR. International and National Expert Group Evaluations: Biological/Health Effects of Radiofrequency Fields. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2014;11: 9376-9408.

Vijayalaxmi. Biological and Health Effects of Radiofrequency Fields: Good Study Design and Quality Publications. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis* 2016; 810 :6–12.

La resistenza antimicrobica rappresenta una grave minaccia globale per la salute. Il fenomeno ha un impatto socio-economico significativo, in particolare negli ambienti nosocomiali e nei teatri operativi militari, dove la fragilità dei pazienti sottoposti a terapie invasive favorisce la diffusione delle infezioni resistenti. Il progetto AGRINTO si propone di implementare e valutare l'impatto del sequenziamento di ultima generazione nell'analisi dei ceppi resistenti. I risultati ottenuti dimostrano che questa innovativa tecnologia consentirà di caratterizzare in modo accurato e approfondito il profilo di resistenza ai farmaci, favorendo l'introduzione di metodiche molecolari e del sequenziamento di nuova generazione in sostituzione degli approcci convenzionali. L'enorme mole di informazioni derivante dal sequenziamento massivo consentirà inoltre di identificare nuove forme di resistenza e di acquisire una comprensione più profonda dei meccanismi alla base del fenomeno, aprendo la strada a nuove strategie terapeutiche. Il continuo progresso in questo settore, rappresentato dal sequenziamento di terza generazione, ha già posto le basi per l'esecuzione dell'analisi direttamente nei siti di interesse, con l'analisi dei dati in tempo reale.

INTRODUZIONE

La resistenza antimicrobica (AMR) rappresenta una delle più gravi minacce alla salute pubblica a livello globale (1). Se inizialmente la scoperta degli antibiotici aveva fatto sperare in una soluzione definitiva alle infezioni batteriche, oggi il loro uso eccessivo e inappropriato ha favorito la selezione di ceppi resistenti (2). Il problema è particolarmente rilevante negli ambienti nosocomiali, dove procedure diagnostiche e terapeutiche invasive facilitano l'ingresso di microrganismi patogeni e, a causa della fragilità dei pazienti, rendono le infezioni più virulente e spesso fatali (3, 4). Secondo l'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS), nel 2019 l'AMR è stata direttamente responsabile di 1,27 milioni di decessi e ha contribuito alla morte di circa 5 milioni di individui (5).

L'acronimo ESKAPE identifica sei dei principali patogeni nosocomiali multiresistenti:

Enterococcus faecium (resistente alla vancomicina, VRE), *Staphylococcus aureus* (resistente alla meticillina, MRSA), *Klebsiella pneumoniae* (produttore di carbapenemasi), *Acinetobacter baumannii*

(spesso resistente ai carbapenemi), *Pseudomonas aeruginosa* (multiresistente, con meccanismi di efflusso e biofilm) ed *Enterobacter spp.* (produttore di beta-lattamasi) (6). L'antibiotico-resistenza assume particolare importanza anche nei teatri operativi militari, dove interventi chirurgici invasivi possono essere complicati da infezioni resistenti (7-9). Per contrastare questo fenomeno, è fondamentale lo studio dei ceppi AMR, la loro caratterizzazione genofenotipica e l'analisi dei determinanti di resistenza antibiotica (resistoma), strumenti essenziali per la sorveglianza e la comprensione dei meccanismi molecolari alla base della resistenza. Grazie alle tecnologie di sequenziamento di nuova generazione (NGS) è possibile una caratterizzazione ad alta risoluzione dei geni coinvolti nella resistenza agli antibiotici, un passaggio cruciale per lo sviluppo di terapie più efficaci (10).

Il progetto AGRINTO (*Analisi Genomica Resistoma Infezioni Nosocomiali dei Teatri Operativi*) si propone di implementare l'utilizzo delle tecnologie di sequenziamento di ultima generazione nelle analisi di antibiotico-resistenza di ceppi col-

lezionati sul territorio italiano, di comparare i dati con le metodiche classiche e valutare la fruibilità delle nuove metodiche nei teatri operativi.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

Il fenomeno dell'antibiotico-resistenza può essere combattuto, o almeno mitigato, attraverso la caratterizzazione dell'agente infettivo mediante procedure comunemente in uso presso i laboratori d'analisi. Analisi classiche come un test fenotipico possono predire la capacità di un batterio di produrre enzimi di resistenza come la β -lattamasi o la sua capacità di formare un biofilm. Altri test quantitativi (E-test o MIC, Minimum Inhibitory Concentration) permettono di valutare la quantità necessaria per inibire la crescita del batterio. Con un'analisi fenotipica o genotipica è possibile predire se uno *Staphylococcus aureus* è resistente alla meticillina, indicando la presenza del gene *mecA* e la probabile resistenza ai beta-lattamici, suggerendo l'utilizzo di antibiotici come la vancomicina, linezolid, o daptomicina. Se il ceppo è multiresistente a più antibiotici, sarà necessario un trattamento con antibiotici ad ampio spettro come la tigeciclina o, in casi gravi, il ceftobiprole, una cefalosporina di quinta generazione. Test genetici come la PCR, la PCR quantitativa e il microarray genotipico forniscono risultati rapidi e precisi per rilevare la presenza di geni di resistenza o mutazioni resistenti-specifiche. Analisi in PCR quantitativa possono rilevare e quantificare la presenza di geni come *bla*NDM (carbapenemasi) nelle *Enterobacteriaceae*. Va inoltre ricordato che una combinazione di test genotipici e fenotipici può rendersi necessaria in quanto un batterio può possedere geni di resistenza ma non essere espressi. Un ceppo di *Klebsiella pneumoniae* potrebbe possedere il gene *bla*KPC (genotipo), ma la sua espressione potrebbe variare. In *Pseudomonas aeruginosa*, le pompe di efflusso possono essere indotte solo in presenza di antibiotici. L'avvento delle tecnologie NGS permette una accurata caratterizzazione del resistoma ed una

gestione più mirata ed efficace delle infezioni nosocomiali causate da patogeni. Questo approccio in uso combinato con le metodiche classiche sta prendendo sempre più campo ed è fondamentale per una medicina personalizzata, consentendo un uso appropriato degli antibiotici e limitando la selezione di nuovi ceppi resistenti.

METODOLOGIA

La raccolta dei ceppi, svolta in due fasi successive, ha coinvolto due unità ospedaliere distinte. In una delle sedi sono stati isolati ceppi sia italiani sia da migranti nordafricani. A titolo esemplificativo, seguirà una breve descrizione della raccolta eseguita nella seconda fase. Sono stati raccolti 34 ceppi di cui 9 da migranti; nello specifico 14 di *K. pneumoniae*, 8 *A. baumannii*, 9 *P. aeruginosa* e 3 *Enterobacter spp.* Tutti sono stati identificati mediante spettrometria MALDI-TOF e sottoposti a test di sensibilità/resistenza agli antibiotici con sistemi automatizzati commerciali. I grafici in figura 1 mostrano i profili di sensibilità (S, verde), resistenza (R, rosso), sensibilità intermedia (I, giallo) e non determinato (N.D., blu) dei ceppi collezionati.

In base al fenotipo, tutti gli isolati sono stati classificati come MDR (Multi Drug Resistant).

Di particolare rilievo la sensibilità alla colistina: 92% in *K. pneumoniae*, 100% in *A. baumannii*, 85% in *P. aeruginosa* e 66% in *Enterobacter spp.* Non sono emerse differenze fenotipiche tra ceppi isolati da migranti e da pazienti locali. Nei ceppi delle *Enterobacteriales* è stata indagata la resistenza alle carbapenemasi tramite Real-Time PCR: tutti i ceppi di *K. pneumoniae* producevano carbapenemasi *bla*KPC. Un'attenzione particolare è stata rivolta ad *A. baumannii* per l'associazione al fenotipo XDR (Extensively Drug-Resistant). Sono stati condotti saggi in vitro e test di virulenza (formazione di biofilm), rivelando una capacità invasiva superiore rispetto ai ceppi di riferimento. L'antibiogramma commerciale ha confermato che tutti i ceppi, tranne uno, sono XDR (Figura 2).

Tutto ciò ha importanti ricadute applicative anche in ambito operativo delle forze armate. In primo luogo, la caratterizzazione genetica, eseguita in laboratori specializzati mediante tecnologia NGS, consente di sviluppare metodiche molecolari specifiche, facilmente applicabili anche nei teatri operativi. Tecniche come la Real-Time PCR o le analisi su microarray forniscono risultati rapidi e precisi, senza particolari criticità logistiche. Sebbene le metodiche classiche siano ancora utili in alcuni casi, si prevede nel breve periodo una loro progressiva e totale sostituzione con approcci molecolari.

In particolare, le tecnologie di sequenziamento di terza generazione, come quelle offerte da Oxford Nanopore Technologies, stanno rivoluzionando il settore grazie alla possibilità di ottenere sequenze genomiche in tempo reale, utilizzando strumentazione portatile e facilmente adattabile a contesti logistici complessi. Ciò significa che, anche in assenza di laboratori centralizzati, è possibile analizzare direttamente sul campo i patogeni multiresistenti, con vantaggi strategici rilevanti in termini di diagnosi rapida in situ, gestione terapeutica mirata e biosorveglianza.

pubblica. Le proiezioni dell'OMS stimano un aumento del numero di decessi e lamentano la scarsità di fondi destinati alla ricerca da parte dei vari paesi, in particolare per la caratterizzazione molecolare dei geni batterici responsabili del fenomeno dell'antibiotico-resistenza. In questo progetto sono stati raccolti più di 100 campioni in due regioni italiane, in due ambienti ospedalieri. La distribuzione delle specie AMR conferma i dati presenti in letteratura sulla diffusione dei principali ceppi responsabili dell'antibiotico-resistenza (ESKAPE) in Italia, così come a livello globale. Oltre alla comparazione tra genotipo e fenotipo associato all'antibiotico-resistenza, sono state effettuate analisi fenotipiche e genotipiche sul viruloma, ovvero il contenuto in geni di virulenza. I profili degli agenti batterici ottenuti con metodiche classiche sono stati confermati con tecniche molecolari e il sequenziamento di nuova generazione.

Le analisi molecolari NGS svolgono tuttavia una funzione molteplice: oltre a fornire un riscontro genotipico/fenotipico coerente con le metodiche tradizionali, consentono di ottenere un quadro dettagliato dell'organizzazione del resistoma, di



Figura 4 - Sequenziamento di terza generazione. In figura viene enfatizzato l'esiguo ingombro spaziale di un chip ed un computer portatile sufficienti per eseguire un sequenziamento mediante la tecnologia dei "nanopori" e l'analisi *in situ* in tempo reale.

CONCLUSIONI

L'antibiotico-resistenza rappresenta oggi una delle principali minacce globali per la salute

individuare nuovi geni di resistenza, di promuovere la ricerca su nuovi target terapeutici e di contribuire allo sviluppo di strategie di sorveglianza

genomica, fondamentali per il contenimento della diffusione dei ceppi multiresistenti.

Questi risultati permetteranno di sostituire le metodiche classiche, difficilmente fruibili in ambienti operativi, con tecniche molecolari più rapide

e specifiche, che a loro volta, nel breve periodo, saranno sostituite dal sequenziamento *in situ* di terza generazione, in tempo reale.

I risultati di questo studio sono stati pubblicati su due riviste internazionali (11, 12).

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

OMS	<i>Organizzazione Mondiale della Sanità</i>
AMR	<i>Resistenza Anti Microbica</i>
XDR	<i>Estremamente Resistente ai Farmaci</i>
ESKAPE	<i>Enterococcus faecium; Staphylococcus aureus; Klebsiella pneumoniae; Acinetobacter baumannii; Pseudomonas aeruginosa; Enterobacter spp.</i>
VRE	<i>Resistente alla vancomicina</i>
MRSA	<i>Resistente alla meticillina</i>
MIC	<i>Concentrazione inibitoria minima</i>
PCR	<i>Razione a catena della polimerasi</i>
NGS	<i>Sequenziamento di nuova generazione</i>
AK, GM, TM, IMP, MRP, CIP, P/T	<i>Amikacina, Gentamicina, Trimetoprim, Imipenem, Meropenem, Ciprofloxacina, Penicillina/Tazobactam</i>

PAROLE CHIAVE

Antibiotico-resistenza, ESKAPE, Next Generation Sequencing.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	a2017.129
Amministrazione appaltante:	Direzione Generale di Commissariato e di Servizi Generali (COMMISERVIZI)
Ente responsabile del progetto:	Istituto di Scienze Biomediche della Difesa
Città, Regione:	Roma, Lazio
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Brig. Gen. Florigio Lista
Recapiti del responsabile del progetto:	Via di Villa Fonseca 4, 00184, Roma
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	+39 06 469141400
E-mail del responsabile del progetto:	direttore@isbd.difesa.it

BIBLIOGRAFIA

- 1) Süle A. Antimicrobial resistance-a global challenge that deserves more attention! *Eur J Hosp Pharm.* 2022 Mar;29(2):65. doi: 10.1136/ejhpharm-2021-003207. PMID: 35190450; PMCID: PMC8899675.
- 2) Mulani MS, Kamble EE, Kumkar SN, Tawre MS, Pardesi KR. Emerging Strategies to Combat ESKAPE Pathogens in the Era of Antimicrobial Resistance: A Review. *Front Microbiol.* 2019 Apr 1; 10:539. doi: 10.3389/fmicb.2019.00539.
- 3) Xu J, Yang Z. Risk factors and pathogenic microorganism characteristics for pneumonia in convalescent patients with stroke: A retrospective study of 380 patients from a rehabilitation hospital. *J Stroke Cerebrovasc Dis.* 2020 Aug;29(8):104955. doi: 10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2020.104955
- 4) Taitt CR, Leski TA, Stockelman MG, Craft DW, Zurawski DV, Kirkup BC, Vora GJ. Antimicrobial resistance determinants in *Acinetobacter baumannii* isolates taken from military treatment facilities. *Antimicrob Agents Chemother.* 2014;58(2):767-81. doi: 10.1128/AAC.01897-13.
- 5) Antimicrobial Resistance Collaborators. (2022). Global burden of bacterial antimicrobial resistance in 2019: a systematic analysis. *The Lancet*; 399(10325): P629-655. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(21\)02724-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(21)02724-0)
- 6) Miller WR, Arias CA. ESKAPE pathogens: antimicrobial resistance, epidemiology, clinical impact and therapeutics. *Nat Rev Microbiol.* 2024 Oct;22(10):598-616. doi: 10.1038/s41579-02401054-w.
- 7) Vitacca M, Marino S, Comini L, Fezzardi L, Paneroni M. Bacterial Colonization in COPD Patients Admitted to a Rehabilitation Respiratory Unit and Impact on Length of Stay: A Real-Life Study. *COPD.* 2018 Dec;15(6):581-587. doi: 10.1080/15412555.2019.
- 8) Zapor MJ, Erwin D, Erowele G, Wortmann G. Emergence of multidrug resistance in bacteria and impact on antibiotic expenditure at a major army medical center caring for soldiers wounded in Iraq and Afghanistan. *Infect Control Hosp Epidemiol.* 2008 Jul;29(7):661-3. doi: 10.1086/588702.
- 9) Murray CK, Yun HC, Griffith ME, Thompson B, Crouch HK, Monson LS, Aldous WK, Mende K, Hospenthal DR. Recovery of multidrug-resistant bacteria from combat personnel evacuated from Iraq and Afghanistan at a single military treatment facility. *Mil Med.* 2009 Jun;174(6):598-604. doi: 10.7205/milmed-d-03-8008.
- 10) Sánchez-Urtaza S, Ocampo-Sosa A, Molins-Bengoetxea A, El-Kholy MA, Hernandez M, Abad D, Shawky SM, Alkorta I, Gallego L. Molecular characterization of multidrug resistant *Acinetobacter baumannii* clinical isolates from Alexandria, Egypt. *Front Cell Infect Microbiol.* 2023 Jul 20;13:1208046. doi: 10.3389/fcimb.2023.1208046.
- 11) Marazzato M, Scribano D, Sarshar M, Brunetti F, Fillo S, Fortunato A, Lista F, Palamara AT, Zaggaglia C, Ambrosi C. Genetic Diversity of Antimicrobial Resistance and Key Virulence Features in Two Extensively Drug-Resistant *Acinetobacter baumannii* Isolates. *Int J Environ Res Public Health.* 2022 Mar 1;19(5):2870. doi: 10.3390/ijerph19052870.
- 12) A decade of genomic and phenotypic adaptation of carbapenem-resistant *Acinetobacter baumannii*. (in press in “Frontiers in Cellular and Infection Microbiology”, 2024. www.frontiersin.org).

Il progetto SIMONA (Sistema Italiano Messa in Orbita da Nave) si inquadra nel contesto dell'accesso nazionale autonomo allo spazio attraverso lo studio e la sperimentazione in scala di un sistema di estrazione di un vettore spaziale da lanciare da sistema navale.

Il sistema di estrazione, che utilizza l'approccio correntemente chiamato "*soft launch*", prevede il raggiungimento di una distanza di sicurezza dal mezzo navale prima dell'accensione dei motori.

Il progetto è articolato in tre fasi.

Nella Fase 1 è stato disegnato il sistema di estrazione capace di lanciare, alla quota di sicurezza stabilita in 80 m, un vettore di massa fino a 60t e diametro fino a 2.5m.

Sono state individuate le prime azioni di messa in sicurezza della nave e del suo equipaggio nel caso di eventi catastrofici derivanti da gravi malfunzionamenti ed è stato sviluppato il disegno del prototipo in scala destinato alla sperimentazione e infine analizzato il mercato catturabile dal sistema di lancio e il suo utilizzo istituzionale.

Sulla base dei risultati ottenuti durante la Fase 1, nella Fase 2 sono state approfondite tre tematiche:

- Messa a punto del dimostratore tecnologico e realizzazione di una serie di prove culminate in due test rappresentativi:
 - Test 1: raggiungimento di condizioni dinamiche (velocità di uscita del vettore dal tubo estrattore) prossime a quelle del sistema reale in scala 1:1.
 - Test 2: controllo del picco di accelerazione (8g) durante il lancio.

Entrambi i test sono stati eseguiti con successo utilizzando sia una spinta pneumatica che una carica pirotecnica. Il Test 1 dimostra che le soluzioni adottate per il sabot, il sistema di stabilizzazione del vettore dentro il tubo ed i metodi per ridurre gli attriti sono soluzioni idonee anche per i regimi di velocità che si incontrano nel sistema in scala reale. Il Test 2 dimostra la capacità di controllare la spinta e di limitarla alla condizione commerciale di lancio di satelliti.

- Valutazione della risposta delle strutture navali, modificate secondo l'analisi di Fase 1, alle condizioni di:
 - detonazione completa di tutti gli stadi del vettore;
 - deflagrazione del primo stadio;
 - caduta del primo stadio durante la movimentazione sul ponte nave;
 - accensione accidentale del primo stadio durante lo stivaggio.
- Analisi dei ricavi e le possibili fonti di finanziamento nel caso di esecuzione delle attività di lancio da nave.

La Fase 3 ha visto lo svolgimento di:

- Estese campagne di sperimentazione per ottenere una statistica dei lanci ai fini di rilevarne la ripetibilità e sensibilità, individuando e rimediando ad eventuali effetti non nominali.

- Integrazione del sistema di lancio con un dispositivo (standard e assolutamente affidabile) di accensione del vettore spaziale una volta estratto dal tubo che possa essere affiancabile e compatibile con i sistemi Safe&Arm di qualsiasi vettore lanciabile dal tubo estraattore progettato in SIMONA.

INTRODUZIONE

Il progetto SIMONA (Sistema Italiano Messa in Orbita da Nave) si inquadra nelle attività di risposta alla esigenza nazionale di accesso autonomo allo spazio realizzato attraverso il lancio di un vettore spaziale da piattaforma marina con la tecnica del *soft launch*.

La tecnica *soft launch*, con il missile che non si accende all'interno del tubo estraattore, come invece accade nell'*hot launch*, ma soltanto dopo l'uscita, è raccomandata nei lanci da nave e sarà adottata come tecnica esclusiva dalla marina britannica, anche per i vantaggi che ha rispetto all'*hot launch* (riduzione del 30% sulle dimensioni e del 50% sulla massa e aumento del 10% sulla gittata).

Il *soft launch* è utilizzato a terra per missili balistici intercontinentali di grandi dimensioni lanciati da veicoli su ruota, come SS-25 russo e DF-31 cinese. Questa tecnica è stata esportata dai lanciatori spaziali di derivazione militare: il russo-ucraino Dniepr (derivato da SS-18) lanciato da silos, il cinese Long March 11 (derivato da DF-31), lanciato da nave.

Per quest'ultimo è stata inizialmente utilizzata la nave cargo De Bo 3 (primo lancio giugno 2019, messi in orbita 7 satelliti), poi una piattaforma adattata (settembre 2020, 9 satelliti) e infine una nuova piattaforma dedicata (dicembre 2022, 9 satelliti).

Anche il Programma SIMONA ha seguito una analoga evoluzione, passando dalla ipotesi di utilizzo di Nave Garibaldi quale vettore lanciante ipotizzato in Fase 1 ad una piattaforma dedicata, oggetto della Fase 3.

Gli obiettivi del progetto SIMONA durante la Fase 3 sono stati:

- Completamento della realizzazione del dimostratore e successiva preparazione per la esecuzione delle prove tramite l'installazione a bordo di un sensore per misurare il raggiungimento della quota prevista nei test e fornire di conseguenza un segnale elettrico di attivazione del sistema di sicurezza e armamento del missile, comandando così l'armamento di pre-accensione del primo stadio.
- Esecuzione delle prove sul dimostratore in accordo alle configurazioni determinate nelle Fasi 1 e 2 e sviluppo dell'analisi dei risultati ottenuti.
- Sviluppare dei costi del sistema navale ed esecuzione di una analisi di costo per l'utilizzo di una eventuale piattaforma navale alternative.
- Analisi della sostenibilità economica del sistema autonomo di accesso allo spazio, sulla base delle analisi del mercato esistente e delle proiezioni future.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

Il problema primario che ha portato alla genesi del progetto risiede nell'indisponibilità dell'Italia di un sistema autonomo per l'accesso allo spazio orbitale. Per ragioni di sicurezza delle popolazioni sorvolate, non è possibile effettuare il lancio da piattaforma tradizionale posta sul suolo nazionale, quindi la soluzione percorribile passa per l'utilizzo di una piattaforma mobile (aerea o navale) in grado di poter effettuare il lancio da zone internazionali ove questo non costituisca rischi per le popolazioni.

La soluzione navale appare particolarmente attrattiva grazie alla possibilità di poter gestire lanci multipli e, potendo gestire carichi estremamente elevati, di non imporre particolari limitazioni alla massa al lancio del veicolo.

Un aspetto critico dell'utilizzo di una piattaforma navale è quello però di poter garantire la sicurezza del personale imbarcato in qualsiasi circostanza nominale o accidentale quale, ad esempio, il catastrofico evento di detonazione del veicolo all'accensione del primo stadio. Affrontare questo tipo di evento richiede lo sviluppo di particolari tecnologie di lancio ad oggi non disponibili in ambito nazionale ed europeo.

La soluzione tecnologica proposta è quella di effettuare l'accensione del primo stadio del vettore quando questo ha raggiunto una distanza minima di sicurezza dalla piattaforma navale, tramite l'utilizzo di un tubo cilindrico di espulsione. Il sistema di Safe&Arm garantisce che il vettore mantenga la condizione di "safe" fino al raggiungimento della quota di sicurezza oltre la quale il sistema di propulsione viene posto in condizioni "arm" e quindi il motore del primo stadio riceve il comando di accensione avviando il primo step del volo propulso del vettore verso l'orbita finale.

La distanza minima di sicurezza è un importante parametro che il programma aveva lo scopo di determinare: tale distanza è quella che consente di escludere qualsiasi danno catastrofico al personale di bordo, anche nel caso di completa detonazione della propulsione del lanciatore.

La proposta inerente il sistema di estrazione ed allontanamento per un sistema di lancio orbitale basato su piattaforma marina costituisce, al livello europeo, una innovazione. In aggiunta, al livello internazionale si evidenziano i seguenti principali aspetti innovativi del sistema di lancio:

- sviluppo di un approfondimento del transitorio di detonazione di veicoli o motori basati su propellente solido di elevate dimensioni (300mm) ed analisi delle sue conseguenze sull'Unità Navale lanciante;

- utilizzo di una piattaforma navale "manned" concepita come piattaforma multi missione (missioni di lancio orbitale, missioni cruise super/ipersoniche con o senza recupero, missioni con utilizzo di veicoli aerei o navali a pilotaggio remoto).

Ciò premesso l'ambizioso traguardo che il progetto si poneva era di, sulla base di un progetto preliminare del sistema di lancio, progettare, realizzare e provare un dimostratore del sistema pneumatico di estrazione e allontanamento del veicolo dalla piattaforma navale e valutare la sostenibilità economica sia in caso di lancio da Nave Garibaldi che da una piattaforma lanciante alternativa appositamente progettata.

METODOLOGIA

Il programma SIMONA si articola in 3 fasi.

Nella prima fase, dopo una identificazione dei requisiti di base e delle caratteristiche dell'evento di detonazione potenzialmente sofferto, viene eseguita l'analisi del limite di vulnerabilità della nave e la stima della distanza minima di allontanamento del vettore dalla nave al momento della accensione del primo stadio.

Benché la detonazione degli stadi di un vettore spaziale sia un evento alquanto raro ma che non è possibile escludere a priori al momento della accensione del primo stadio, sono stati valutati le onde d'urto e di calore generate dalla detonazione completa del vettore. I risultati sono stati ottenuti grazie alla corrispondenza tra la massa di propellente contenuta nel vettore e una massa equivalente di TNT e con lo stesso principio sono stati ottenuti i dati della frammentazione e la dinamica dei frammenti generati dall'esplosione.

Ai fini della valutazione dei limiti di vulnerabilità è stato impiegato il Codice VULNUS con cui sono stati modellizzati la struttura della nave (ponti, paratie, locali interni), i suoi sotto-assiemi primari (apparato motore, di generazione, sistema di combattimento), le catene funzionali che collegano i sotto-assiemi e la cui integrità è necessaria

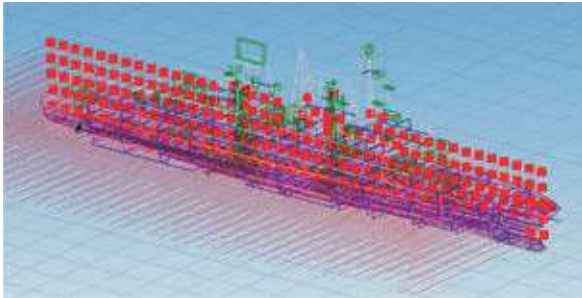


Figura 1 - Vista del modello VULNUS di Nave GARIBALDI.

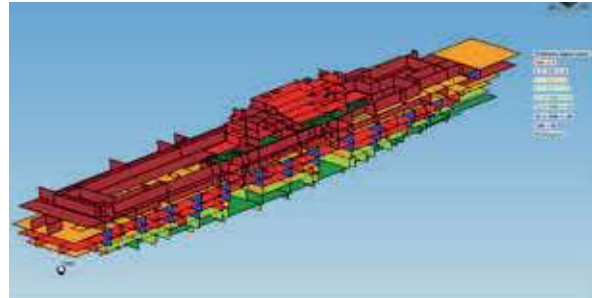


Figura 2 - Pannellatura interna nave - Spessori.

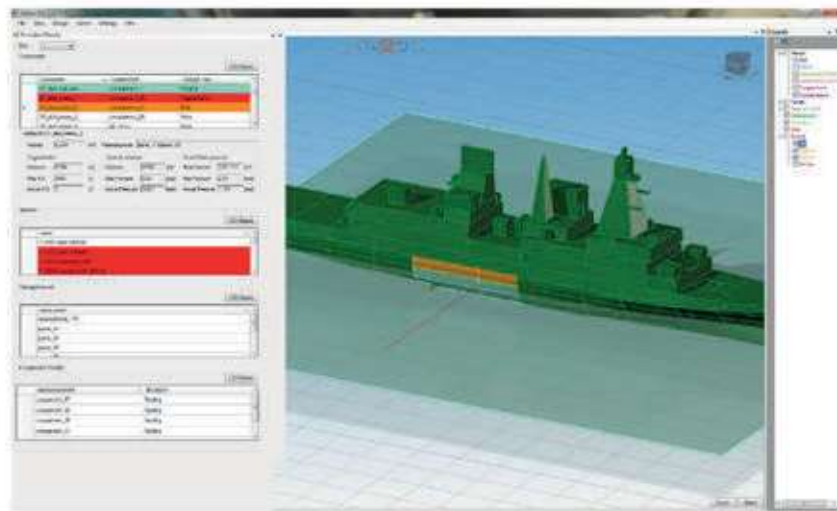


Figura 3 - Vista del modello VULNUS di Nave GARIBALDI.

per espletare determinate missioni ed i principali meccanismi di danno legati ad AIREX (blast, frammentazione, allagamento, incendio).

Gli studi e le simulazioni effettuate portando alla conclusione che le distanze di sicurezza minime,

al fine di minimizzare ogni rischio per cose e persone, siano di a 80 m di quota sopra il ponte di volo e 30 m dietro lo specchio di poppa.

Sulla base dell'identificato progetto preliminare di riferimento del sistema di lancio e dei limiti di

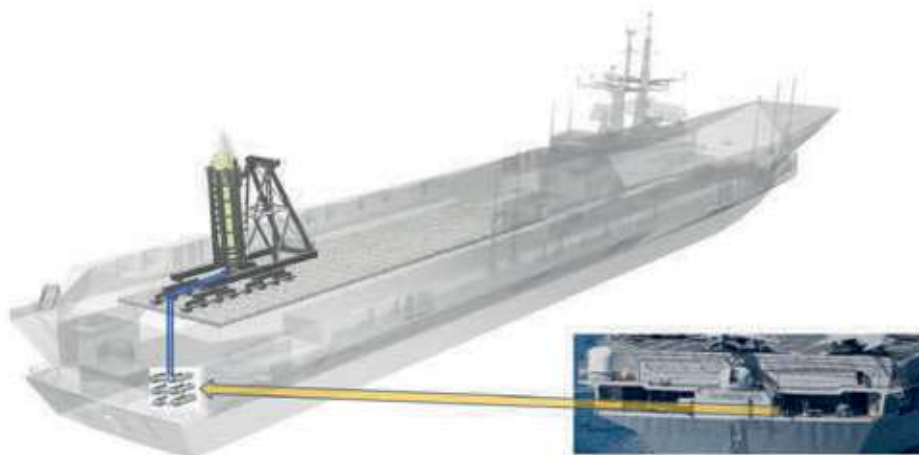


Figura 4 - Posizionamento ipotizzato del sistema di estrazione/lancio.



Figura 5 - Sistema di estrazione: vista complessiva.

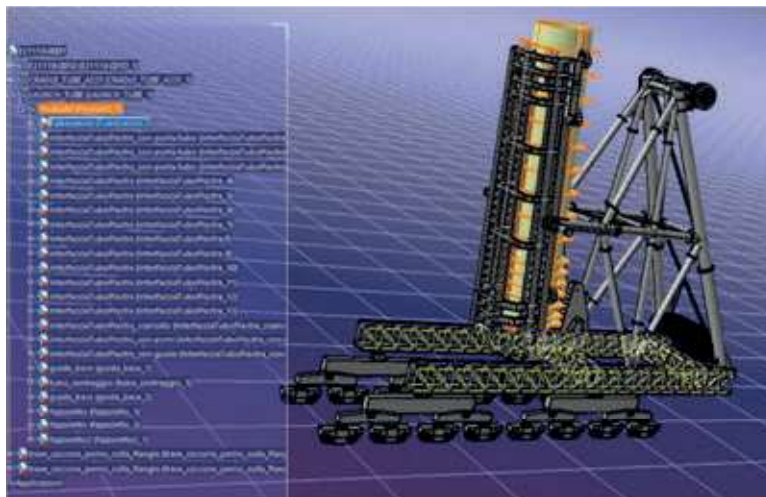


Figura 6 - Disegno in CAD del tubo di lancio.

sicurezza citati, sono ostati eseguiti sia il progetto del sistema di estrazione e allontanamento che quello del suo dimostratore.

Sono state condotte anche attività di analisi di mercato e di proficuo utilizzo istituzionale.

Nella fase 2 è stata completata l'analisi di vulnerabilità della piattaforma navale, è stata valutata la risposta delle strutture navali, modificate secondo l'analisi di Fase 1, alle condizioni di detonazione completa di tutti gli stadi del vettore, deflagrazione del primo stadio, caduta del primo stadio durante la movimentazione sul ponte nave ed infine accensione accidentale del primo stadio durante lo stivaggio.

Gli approfondimenti della Fase 2 hanno evidenziato come gli eventi estremi analizzati siano tali da causare danni alla nave anche significativi, ma non da comprometterne la galleggiabilità o l'integrità.

Il primo studio presentato, evoluzione di quello effettuato nella prima fase progettuale, mostra come l'onda di pressione generata da un'eventuale detonazione accidentale a 80 m di quota e 30 m a poppa sia tale da deformare in maniera permanente una porzione importante del ponte di volo nella zona di poppa, con frecce anche molto significative in alcune zone sovrastanti l'hangar, caratterizzato da campate significative. Allo stesso tempo, il calcolo esclude un collasso globale

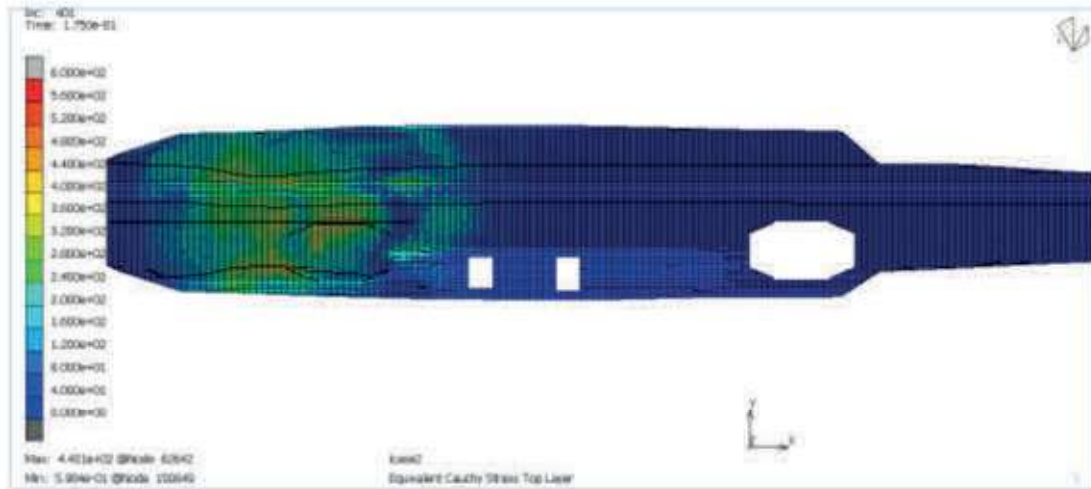


Figura 7 - Tensioni equivalenti di Cauchy alla detonazione.

del ponte di volo e di conseguenza la robustezza longitudinale della struttura rimarrebbe in larga parte garantita dato che la porzione centrale della nave è sostanzialmente integra.

Il ponte di volo si è dimostrato in grado di assorbire sia gli impatti dei frammenti generati dalla deflagrazione sia l'eventuale caduta del primo stadio da 19 m di quota; in entrambi i casi la struttura risulterà

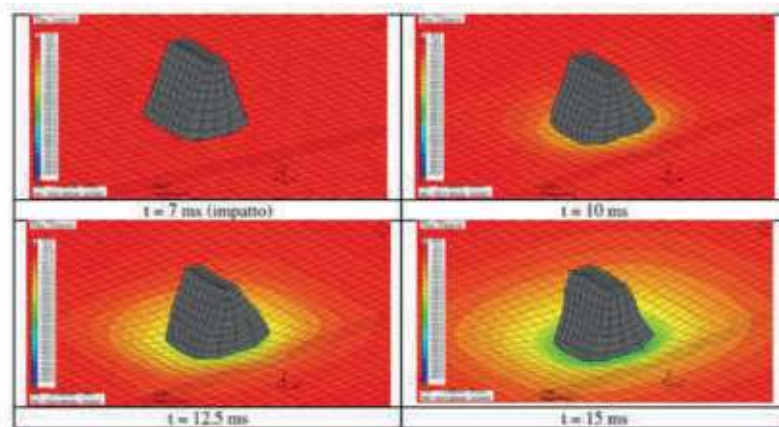


Figura 8 - Spostamento nodale della direzione Z (mm) all'impatto da frammento.

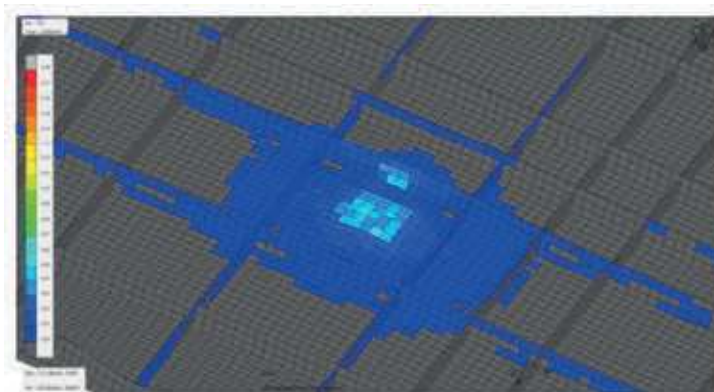


Figura 9 - Deformazione plastica totale elementi nave.

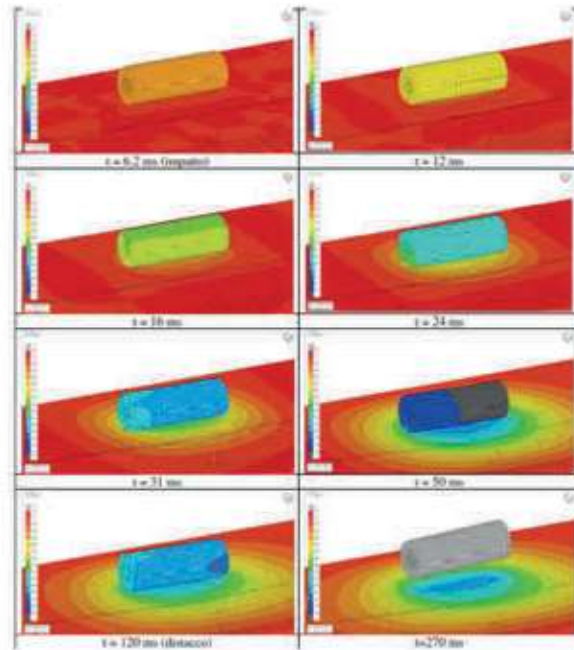


Figura 10 - Simulazione impatto per caduta per primo stadio.

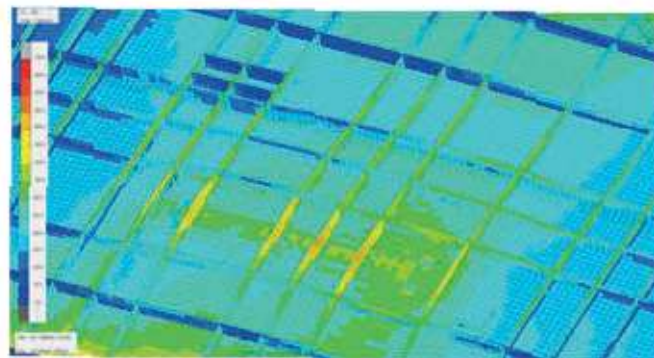


Figura 11 - Tensione equivalente di Cauchy – Instante massima deformazione.

rebbe danneggiata in maniera permanente pur non sollevando alcun dubbio sulla tenuta strutturale complessiva del ponte di volo e della nave.

In ultimo lo studio ha evidenziato come la vampa del primo stadio in posizione di stoccaggio non attinga direttamente la sagoma del ponte di volo,

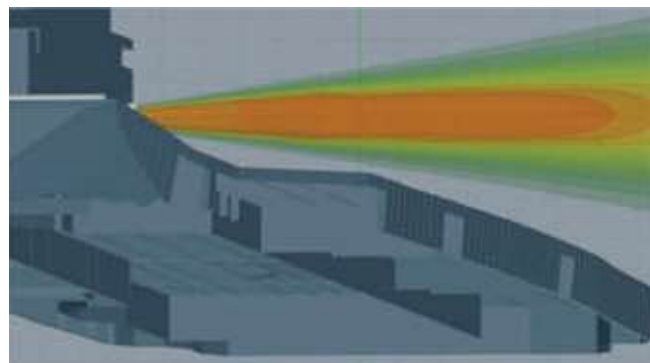


Figura 12 - Manca interazione tra vampa diretta primo stadio e struttura nave.

riducendo significativamente il rischio termico per le strutture in caso di accensione accidentale del sistema propulsivo durante lo stivaggio. Risulta pertanto confermata la fattibilità del lancio da parte di Nave Garibaldi, purché siano prese le opportune misure per il rifugio del personale di bordo dettagliate nella prima fase progettuale. Nella conclusiva fase 3 viene completata la realizzazione del dimostratore concentrando gli sforzi sullo sviluppo del progetto del Safe&Arm, un componente cruciale che ha il compito di prevenire accensioni non intenzio-

nali o premature del motore, assicurando che l'attivazione avvenga solo nelle condizioni pre-stabilite ed in massima sicurezza. È stato deciso di implementare un sistema di S&A basato su due tecnologie complementari ed indipendenti; un sistema elettronico di monitoraggio dei parametri critici che autorizza l'accensione del motore solo quando tutte le condizioni operative e di sicurezza sono soddisfatte ed un sistema meccanico a sgancio di sicurezza, progettato per impedire l'attivazione non intenzionale del propulsore. Questa doppia protezione assicura

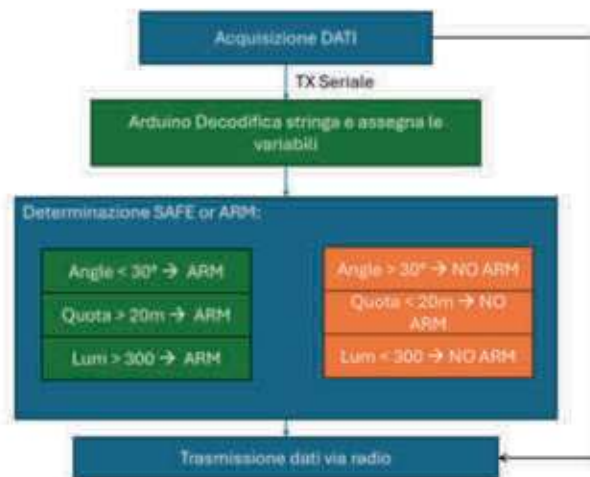


Figura 13 - Logica di decisione di armamento ed accensione.

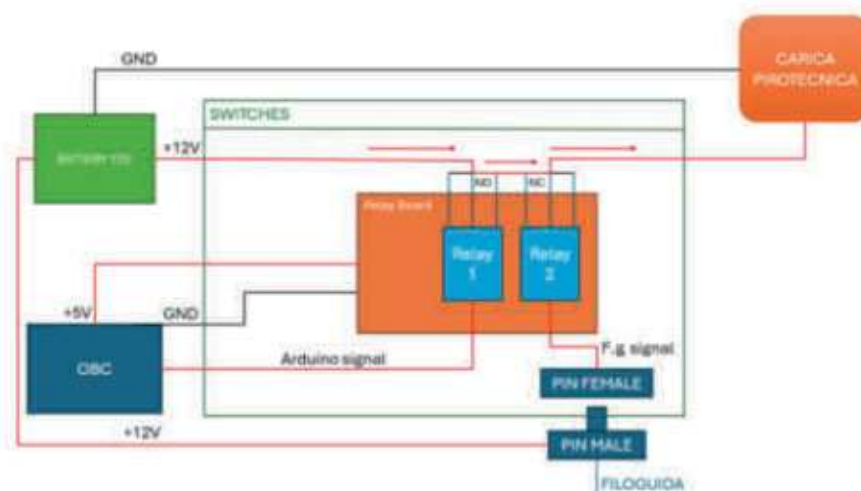


Figura 14 - Schema a blocchi sistema elettronico e meccanico.

che anche in caso di malfunzionamento o errore di uno dei due sistemi, l'altro possa intervenire, garantendo la sicurezza delle operazioni e minimizzando il rischio di accensioni accidentali. Il sistema di Safe & Arm (S&A) sviluppato per il progetto SIMONA ha superato con successo i test, dimostrando un'elevata affidabilità sia nella fase di armamento che nell'accensione della carica pirotecnica. La combinazione dei sensori elettronici e del sistema meccanico di sicurezza ha assicurato il rispetto dei parametri di missione, prevenendo accensioni accidentali e garantendo che l'attivazione avvenisse solo in condizioni ottimali.

Successivamente sono state eseguite le prove e analizzati i risultati. La sperimentazione è stata eseguita al Poligono di Tiro "Le Macchie" Barisciano (AQ) che ha visto eseguire complessivamente 108 lanci in 12 campagne suddivisi sia in lanci pirotecnici che pneumatici volti ad acquisire una elevata statistica delle dispersioni della gittata e delle accelerazioni.



Figura 15 - Lancio sperimentale presso Poligono di tiro "Le Macchie".

Si è quindi passati alla stima dei costi necessari per la trasformazione di Nave Garibaldi in unità per il lancio di vettori e valutare i relativi costi di gestione. Tale analisi si è svolta su due fronti, da

un lato la valutazione dei costi di adeguamento di Nave Garibaldi per integrare il sistema di lancio (Costi Non Ricorrenti), dall'altro la valutazione dei costi di esercizio per l'attuazione di una missione di lancio (Costi Ricorrenti). L'analisi si è basata sulle risultanze dello studio di integrazione del lanciatore su Nave Garibaldi sviluppato nelle precedenti fasi del progetto.

Sulla base delle analisi effettuate, emerge che la trasformazione di Nave Garibaldi in piattaforma per il lancio di vettori per la messa in orbita di satelliti sottintenda un *effort* di ingegneria stimato in 75.000 h e una tempistica di trasformazione di 24 mesi, per un costo indicativo pari a:

- 150 mln € in termini di Costi Non Ricorrenti;
- 26 mln € in termini di Costi Ricorrenti su ogni lancio.

Successivamente sono stati condotti l'analisi e lo studio progettuale di una piattaforma navale alternativa in termini di definizione del piano generale e del piano delle capacità, analisi strutturale e stima di peso, definizione delle condizioni di carico e valutazione della stabilità, realizzazione dei calcoli idrodinamici (resistenza al traino e tenuta al mare) e stima dei costi di costruzione.

A partire dall'analisi di funzionalità dell'unità, analizzando il piano generale ed il piano di capacità sono state stimate le dimensioni principali (146.4 m di lunghezza, 36 m di larghezza e 6 m di altezza), una stima del peso dello scafo (da 3700 a 4200 t circa a seconda della configurazione) ed il dimensionamento per il carico locale derivante dal lancio. Sono state successivamente definite le condizioni di carico e, sono state effettuate sulla base di queste le valutazioni della stabilità ed i calcoli idrodinamici relativi alla resistenza al traino (funzionali alla determinazione dei costi relativi) ed alla tenuta al mare; in particolare è stato verificato che il bordo libero durante il lancio ha una variazione conforme alla normativa vigente.

Sono stati infine stimati i costi di costruzione dello scafo (dagli 11 ai 13 M€ circa a seconda della configurazione).



Figure 16 e 17 - Rendering dell'Unità.

In ultimo il progetto ha sviluppato una analisi di sostenibilità economica di entrambe le soluzioni vagliate.

Dall'esame dei risultati ottenuti è emerso che il una stima di costo ricorrente realistico è di 10,3 k€/kg in orbita utilizzando Nave Garibaldi a fronte di 4,4 k€/kg con l'utilizzo della piattaforma alternative di nuova concezione.

Tale dato, unitamente ai costi non ricorrenti citati in precedenza, suggeriscono che l'opzione di impiego di una piattaforma navale alternative è sempre preferibile all'utilizzo di Nave Garibaldi in termini di sostenibilità economica sia sul breve che sul medio/lungo periodo.

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

Gli utilizzi ipotizzabili sono molteplici sia in campo prettamente militare che in ottica dual use.

Per quanto attiene la valenza militare, il sistema consentirebbe all'Italia sia l'effettuazione indipendente di missioni di inserimento orbitale di satelliti militari che un eventuale sviluppo di missioni ad implementazione rapida (*Rapid Response Missions*).

Il sistema di estrazione e lancio derivante dal Progetto SIMONA può essere esteso/affiancato da una capacità di lancio di vettori sub-orbitali super/

iper sonici ed anche utilizzato come centrale di lancio per veicoli a pilotaggio remoto.

Il sistema di estrazione proposto potrebbe rappresentare una solida base di partenza per un eventuale progetto ed utilizzo di sistemi di lancio sia da sommergibili che per il lancio di veicoli orbitali da superficie terrestre (a similitudine di quanto recente visto su sistemi russi di lancio da carro stradale o da treno).

In ottica di valenza duale il sistema proposto, con le regole internazionali vigenti, porta l'Italia, in qualità di paese che ospita il sistema di lancio (i.e. la nave), a entrare a far parte dei paesi con capacità di accesso allo spazio. Inoltre il sistema di allontanamento progettato ed analizzato durante le campagne di lancio, ha numerosi potenziali impieghi in ambito civile; si cita a titolo di esempio un veicolo per trasporto *unmanned* supersonico punto-punto che utilizzasse un booster di spinta per innesco del motore super/ipersonico. Il sistema consentirebbe l'esecuzione di missioni ad implementazione rapida in ambito civile ed in risposta ad eventi di crisi o incidentali.

CONCLUSIONI

Analizzando gli aspetti commerciali si sottolinea come la capacità nazionale di lancio di piccoli satelliti che possa essere caratterizzato da costi non elevati a causa della capacità di esecuzione di missioni multiple, costituisce un asset di elevata attrattività commerciale nella attuale prospettiva di vertiginoso aumento della richiesta di messa in orbita di piccoli satelliti civili. L'approccio al lancio tramite piattaforma navale, di cui il sistema di estrazione proposto costituisce l'elemento critico abilitante, è l'unico che permetterebbe all'Italia un accesso indipendente allo spazio orbitale per carichi utili di massa significativa (150Kg). La condizione di possedere tale capacità nazionale di accesso all'orbita consentirebbe all'industria italiana di non soffrire penalizzazioni competitive che le deriverebbero nel caso dovesse dipendere dall'acquisto di sistemi di lancio in ambito internazionale.

PAROLE CHIAVE

Rapid Response Missions, Accesso allo spazio, Orbita, Satelliti, Lanciatore navale, Safe&Arm.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	A2019.041
Amministrazione appaltante:	Direzione degli Armamenti Navali (NAVARM)
Ente responsabile del progetto:	Scuola di Ingegneria Aerospaziale
Città, Regione:	Roma, Lazio
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Prof. Ing. Paolo Teofilatto
Recapiti del responsabile del progetto:	Via Salaria 851 – 00138 – Roma
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	+39 06 49919761
E-mail del responsabile del progetto:	paolo.teofilatto@uniroma1.it

BIBLIOGRAFIA

UK soft vertical launch: a flexible solution for integrated ground and naval air defense”, Defense Technical Information Centre, doc. ADPO10844 (2000).

“Trajectories of Launch and reentry systems”, Lecture Notes of the School of Aerospace Engineering, academic years 1995-2024.

Richardson, J. M. Blackwood, M. J. Hays and T. Skinner, SOLID ROCKET LAUNCH VEHICLE EXPLOSION ENVIRONMENTS, 2015.

Kingery, C. N., Bulmash, G., Airblast Parameters from TNT Spherical Air Burst and Hemispherical Surface Burst, ARBRL-TR-02555 (April 1984).

Salzman, P., Morgan, G., TRW Solid Rocket Motor and Detonation Handbook, TRW, (June 1992).

Allman, R. M., Titan 34D-9 Failure Investigation and Recovery, AAS 88-055, (1988).

Elwell, R. B., Irwin, O. R., Vail, R. W., Project SOPHY – Solid Propellant Hazards. Program, Aerojet AFRPL-TR-67-211, Volumes I and II, (Aug 1967).

Weals, F. H., Wilson, C. H., High Explosive Equivalency Tests of Rocket Motors, China Lake, NOTS TP 3910, (Nov 1965).

Woods, D. F., Scambia, J. K., Minuteman (LGM-30) Impaler Test Report, 2705th Airmunitions Wing OOOY-TR-66-509, (May 1966).

FINCANTIERI. (2015). Multipurpose Patrol Vessel (PPA) Seakeeping Study.

Solomos, V. K. (2013). Report Calculation of Blast Loads for Application to Structural Components. JRC EUR 26456 EN.

Delbello. (1986, Gennaio). Registro dei pesi ed elementi di stabilità. Trieste: Fincantieri.



LA RICERCA IN AMBITO INTERNAZIONALE



INTRODUZIONE

Nell'alveo della cooperazione internazionale, sia in ambito europeo (prevalentemente in coordinamento con l'Agenzia Europea per la Difesa, *European Defence Agency* - EDA) che NATO ed extra-europeo, anche attraverso accordi bi-/multilaterali laterali, l'Italia

sostiene e ha in essere, da anni, una rilevante e proficua attività collaborativa di ricerca tecnologica (R/T).

Tra i progetti di ricerca che possono ritenersi esemplificativi di tale attività di cooperazione internazionale R/T si evidenziano, in particolare:

- *Cyber Electromagnetic Resilience Evaluation Environment* (**CERERE**)
- *Bionics for Veterans* (**BIOVET**)

La valutazione dell'efficacia *cyber* di un sistema è attualmente limitato ad attività manuali di simulazione di attacco o assistite basate su procedure note, offrendo valutazioni parziali limitate all'*expertise* e alla conoscenza del momento del *team* di analisi. Questo approccio non è in grado di misurare l'efficacia del sistema rispetto ad attacchi non noti come gli *zero-day* o l'effettiva capacità di adattarsi delle contromisure presenti. **CERERE** (*Cyber Electromagnetic Resilience Evaluation Environment*) nasce per superare questi limiti, proponendo un *framework* automatizzato basato sul principio della resilienza che può avere una stretta relazione con il concetto di efficacia *cyber* per sistemi complessi, come infrastrutture critiche e reti militari.

CERERE non si concentra sulle vulnerabilità note, ma sul comprendere la capacità del sistema di identificare un potenziale attacco osservando gli effetti informatici generati dallo stesso su tutti i sotto-sistemi impattati e di garantire in un tempo adeguato l'applicazione di CoA (*Course of Action*) in grado di bloccarne l'esito finale. Il *framework* si ispira al metodo Monte Carlo mediante simulazioni eseguite in stile *wargame*, dove un modulo di attacco e di uno di difesa interagiscono in un ambiente sintetico. Uno genera continuamente *kill chain* ottimizzandone l'efficacia attraverso algoritmi euristici, l'altro, laddove la catena venga rilevata, sceglie strategie di contenimento utilizzando l'intelligenza artificiale per rispondere sempre meglio agli attacchi identificati.

L'approccio è stato validato su due scenari realistici: una rete di produzione elettrica e una rete tattica militare di convogli in movimento. In entrambi i casi, CERERE ha permesso di valutare la resilienza effettiva delle configurazioni e di individuare quali ottimizzazioni intraprendere, in termini di *detection* più accurata o di strategie di intervento più mirate o rapide, migliorando l'efficacia complessiva delle contromisure esistenti.

INTRODUZIONE

L'interesse per la resilienza informatica è un tema che sta suscitando sempre più interesse, spinto dalla crescente dipendenza dei sistemi militari da sotto-sistemi COTS e architetture net-centriche in molti casi basate su infrastrutture radio tattiche. Questi fattori hanno ampliato e diversificato significativamente il perimetro di esposizione e di controllo in caso di attacchi informatici [1,2,3]. Di conseguenza, è pratica comune condurre test regolari attraverso attività di *penetration testing* o *red teaming* [4], al fine di individuare eventuali vulnerabilità o la possibilità di eludere determinate

contromisure di sicurezza. Tuttavia, i test manuali risultano onerosi in termini di tempo e risorse, richiedendo personale altamente specializzato [5]. Per questo motivo, è cresciuto l'interesse verso strumenti automatizzati denominati BaaS (*Breach and Attack Simulation*) che oggi includono diversi *tool* sia *open source*, sia commerciali [4,6].

Il *framework* **CERERE** propone un approccio alternativo rispetto allo stato dell'arte, modellando gli attacchi come effetti sul sistema, invece di applicare gli effettivi *exploit* per sfruttare una vulnerabilità (le Procedure) che purtroppo è applicabile solo per ciò che è già esistente. Questo approccio

limita quindi la valutazione alle sole procedure osservabili, che non tiene conto di quello che potrebbe essere impiegato nel futuro. CERERE permette di valutare la resilienza dei sistemi nella loro configurazione corrente e di identificare le contromisure più efficaci, facendo interagire moduli offensivi e difensivi in una sequenza di simulazioni iterative in cui non viene eseguita realmente la procedura, ma vengono iniettati nel sistema gli effetti che tale procedura genera, effetti che sono indipendenti dalla modalità di sfruttamento della vulnerabilità perché legati esclusivamente alla Tecnica e Tattica di interesse.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

Mentre gli approcci tradizionali risultano efficaci nella validazione dei sistemi contro vulnerabilità note [7,8,9,10,11,12], essi si basano sull'esecuzione di procedure reali o su *repository* noti di *exploit*, limitando la capacità di valutare scenari complessi e nuove *kill chain*. In particolare, ciò diventa un limite significativo nel contesto delle *Cyber Electromagnetic Activities* (CEMA), che richiedono spesso catene di attacco composte da più tecniche, spesso sconosciute, e adattate a specifiche tecnologie dei sottosistemi coinvolti [13].

Per superare queste limitazioni, il progetto CERERE propone un cambio di paradigma: spostare l'attenzione dall'esecuzione tecnica degli attacchi all'emulazione degli effetti concatenati che tali attacchi generano sui sottosistemi, indipendentemente dalle specifiche tecniche di *exploit* utilizzate, iniettando nell'ambiente sintetico tutte variazioni ad esse correlate (e.g. esecuzione di un processo, cambio di un utente, creazione di un nuovo *file*). Questo approccio consente una valutazione centrata sulla capacità del sistema di rilevare tali effetti indipendentemente dalla loro specificità, piuttosto che sul riconoscere l'effettiva modalità con cui viene permesso. In tal modo, è possibile verificare se il sistema sotto test sia stato progettato per adattarsi e rilevare a livello comportamentale la tecnica di at-

tacco e quindi ripristinare le capacità compromesse entro un intervallo di tempo accettabile, o per garantire intrinsecamente la continuità operativa delle proprie funzioni critiche impedendo all'attacco di impattare sul sistema.

La combinazione di algoritmi euristici per la generazione degli attacchi, modelli di intelligenza artificiale per la selezione delle contromisure e un ambiente di simulazione strutturato come un *wargame* automatizzato, consente di misurare in modo sistematico la *cyber resilience* del sistema definita come il "garantire nel tempo determinati parametri di *performance* operativa". Attraverso simulazioni multiple con diverse configurazioni, è possibile confrontare e quantificare l'efficacia di una o più catene di attacco rispetto alla strategia di risposta adottata (CoA), utilizzando metriche di resilienza specifiche per ciascun dominio applicativo.

METODOLOGIA

Il progetto CERERE ha portato alla realizzazione di un dimostratore del *framework* a **TRL 5**, composto da cinque moduli principali che cooperano per valutare in modo automatizzato la resilienza di sistemi complessi, come infrastrutture critiche e reti militari, contro attacchi CEMA.

Il *Synthetic Environment* replica il sistema da testare al fine di valutarne la resilienza contro attacchi CEMA. Il modulo di *Adversary Emulation*, basato su algoritmi euristici, genera automaticamente *kill chain* composte da azioni derivate dalle TTP della Mitre ATT&CK modellate come precondizioni ed effetti, migliorandone progressivamente la scelta attraverso iterazioni successive. Il modulo di *Response Emulation*, supportato da IA, modella le contromisure attivabili al rilevamento di compromissioni. Questo modulo impiega due tipologie di agenti: uno addestrato che seleziona risposte basate sulle osservazioni, e uno adattivo che migliora le sue capacità nel tempo. Il *Simulation Control* coordina le simulazioni, misura gli esiti in termini di resilienza e dirige l'interazione tra moduli. Infine, il *Presentation Layer* fornisce

un'interfaccia intuitiva per la configurazione delle simulazioni e l'analisi dei risultati.

Durante una simulazione, l'utente seleziona lo scenario e i parametri. Il sistema genera automaticamente *kill chain* e risposte, esegue i *round*, raccoglie i risultati e valuta la resilienza rispetto a metriche definite. Il *framework* è stato validato in due scenari: una rete di produzione elettrica e un convoglio militare in movimento.

Nel primo caso, CERERE ha evidenziato rischi potenziali, come la perdita di operatività, e ha identificato contromisure efficaci. Nel secondo, ha rilevato vulnerabilità come la perdita di pacchetti nella rete tattica, selezionando le difese più adatte anche in funzione dei vincoli temporali. In entrambi i casi, il *framework* ha dimostrato la sua efficacia nel guidare l'ottimizzazione delle strategie difensive.

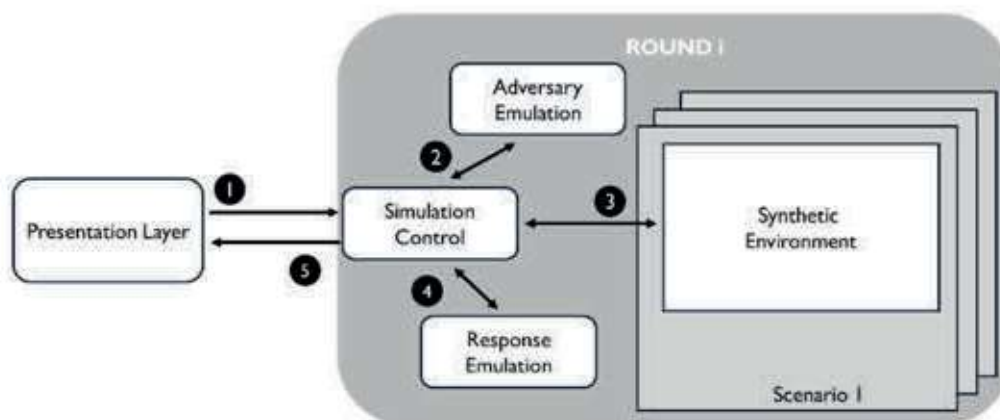


Figura 1 - i-esimo *round* di simulazione in CERERE.

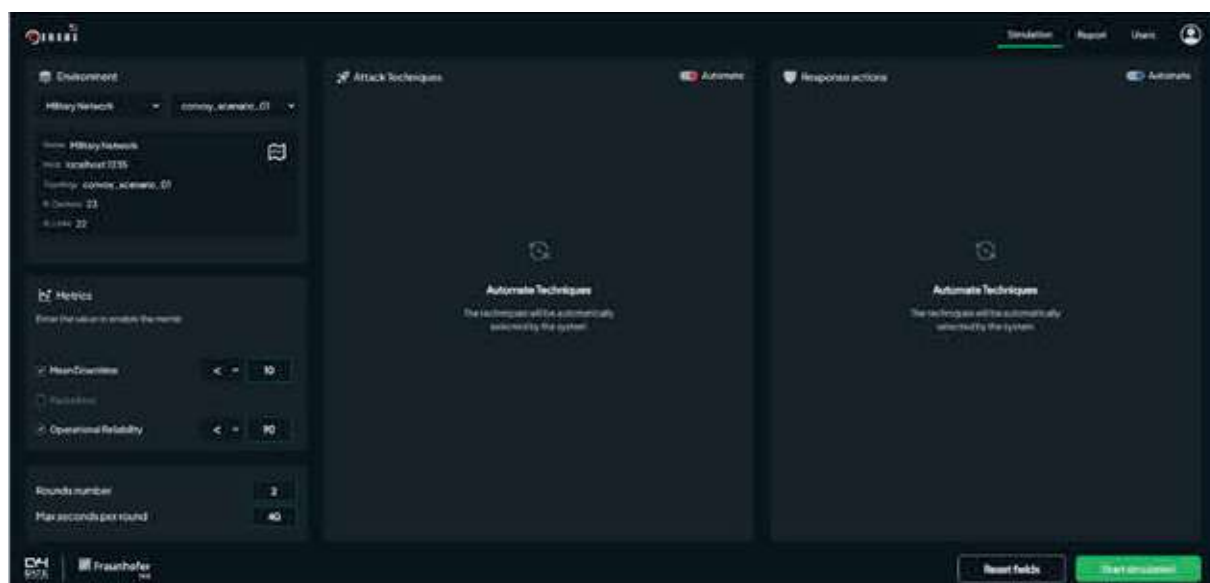


Figura 2 - Interfaccia principale di CERERE che permette all'utente di configurare la simulazione da eseguire attraverso la selezione dell'ambiente e delle metriche da testare, il numero di *round* e i tempi in cui l'ambiente deve "resistere". Infine, l'utente ha la possibilità di selezionare attacchi e risposte automatiche o manuali in base al tipo di analisi di interesse.

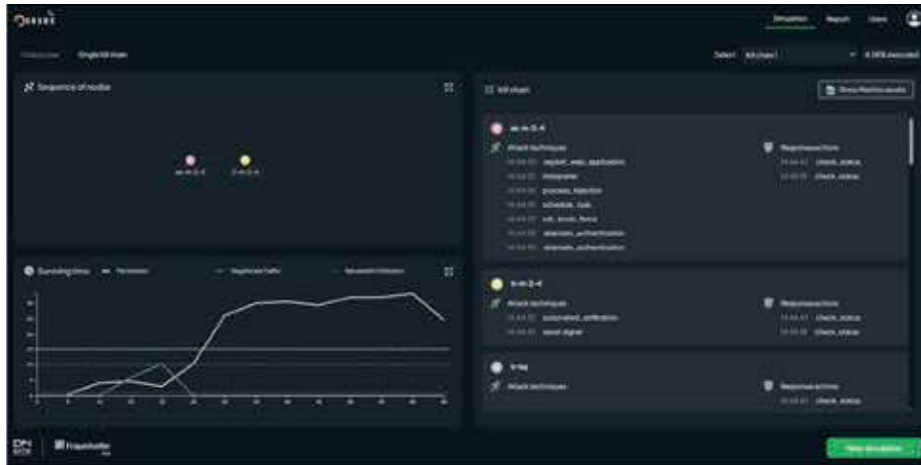


Figura 3 - Interfaccia di dettaglio dei risultati della simulazione eseguita con CERERE. In questo caso, viene mostrato il dettaglio della *kill chain* 1. Nella parte destra sono esplicitate le tecniche eseguite dalla *kill chain*, indicando su quale nodo del sistema sono state applicate e in che tempi. Nella parte sinistra, invece, viene mostrata la sequenza di nodi attaccati, insieme al grafico che illustra come le metriche di resilienza selezionate (in questo caso, “*illegitimate traffic*” e “*bandwidth utilization*”) si comportano nel tempo rispetto ai *threshold* definiti in fase di configurazione. In questo esempio, la metrica “*illegitimate traffic*” risulta violata.



Figura 4 - In questo caso il sistema ha implementato contromisure diverse rispetto alla Figura 3, in cui veniva eseguita solo l’azione “*check action*”, corrispondente all’*intrusion detection system* (IDS). In questa simulazione, sono state intraprese azioni aggiuntive, come l’isolamento del nodo compromesso e il passaggio a una tecnologia radio resistente al *jamming*. Sebbene queste contromisure contribuiscano a mitigare il danno e a recuperare la comunicazione, il sistema viene comunque considerato non resiliente, poiché il recupero non avviene nei tempi ritenuti accettabili per garantire la continuità operativa.

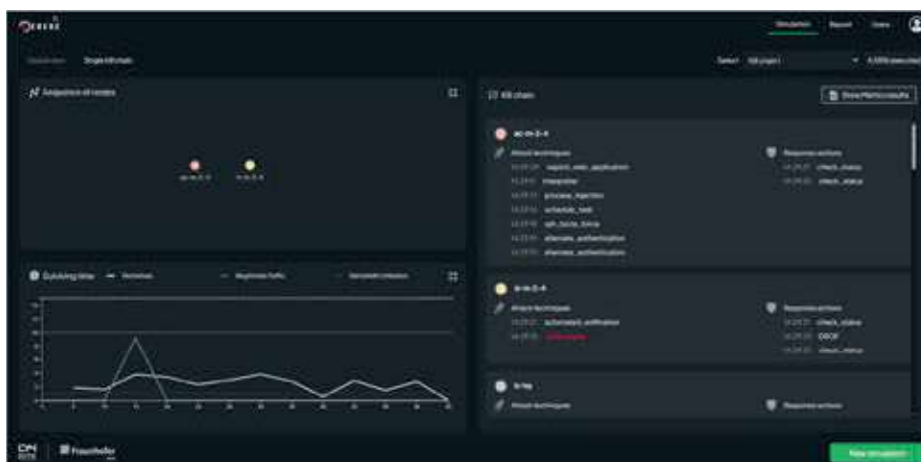


Figura 5 - In quest’ultima simulazione, si osserva come l’utilizzo di contromisure tempistiche, come l’identificazione e l’immediato blocco del traffico malevolo (“*DROP*”), consenta di prevenire il successo dell’azione finale “*send signal*”, destinata all’esfiltrazione della posizione per effettuare il *jamming*. Nonostante l’attaccante sia riuscito a compromettere due nodi, il sistema risulta comunque resiliente, poiché l’attacco non ha avuto effetti sulle capacità di comunicazione.

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

Questo è il primo *framework* di valutazione della resilienza che sposta l'attenzione dall'esecuzione degli attacchi alla generazione degli effetti degli attacchi stessi e alla valutazione degli impatti finali sulle *performance* operative dell'intero sistema. Questa trasformazione definisce la resilienza come la capacità di un sistema di:

- Prevenire l'esecuzione di azioni specifiche (cioè, effetti) su uno o più sottosistemi critici, garantendo la continuità operativa anche in condizioni degradate
- Rilevare le intenzioni dell'attaccante osservando gli effetti risultanti dalla catena di esecuzione
- Incorporare processi di contenimento efficienti, in grado di bloccare intrinsecamente o intervenire sui sottosistemi compromessi applicando delle CoA prima che la *kill-chain* sia stata completata.

Questo approccio innovativo consente una valutazione completa della resilienza in ambienti critici o militari, spesso vulnerabili ad attacchi sconosciuti, per i quali sarebbe difficile disporre di procedure di attacco predefinite da testare.

Il dimostratore del *framework* ha fornito la prima validazione dell'ipotesi che lo spazio degli attacchi coincide con quello degli effetti. Esteso ad altri domini, il *framework* supporta la preparazione delle missioni, consentendo di valutare le ripercussioni di un attacco CEMA sull'operazione permettendo di analizzarne i rischi, gli impatti sul sistema, le capacità di rilevamento e risposta, nonché la progettazione di processi di recupero per ripristinare tempestivamente i sottosistemi compromessi.

CONCLUSIONI

Il progetto CERERE ha progettato un *framework* per testare la resilienza e ottimizzare le difese contro attacchi in ambienti sintetici che rappresentano eventuali sistemi multi-dominio complessi, come infrastrutture critiche e reti militari, che includono non solo sistemi IT/IoMT ma anche sistemi RF.

Questo *framework* combina diversi moduli avanzati, tra cui la modellazione dell'ambiente di esecuzione, la generazione degli attacchi e l'orchestrazione delle risposte, e un'interfaccia utente semplice da usare. L'obiettivo è fornire un *tool* automatizzato e completo per valutare quanto un sistema può resistere ad una o più categorie di attacchi combinati finalizzati ad impattare la capacità operativa del sistema. È stato testato su due scenari reali: una rete di produzione elettrica e una rete tattica militare, ottenendo informazioni su come tali sistemi erano in grado di reagire ai diversi tipi di attacchi e quali strategie di difesa erano più efficaci nelle varie situazioni.

CERERE è in grado di misurare oggettivamente la resilienza del sistema, grazie agli algoritmi che generano varie sequenze di attacchi basati sull'effetto che questi avranno sul sistema. Inoltre, il *framework* utilizza l'IA per migliorare continuamente le strategie difensive (CoA), realizzando quindi un metodo di apprendimento e valutazione basato sulla competizione.

Il progetto potrà essere espanso includendo nuovi ambienti simulati e perfezionando ulteriormente le capacità di analisi per affrontare un numero maggiore di scenari critici.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

IA	<i>Intelligenza Artificiale</i>
CEMA	<i>Cyber-ElectroMagnetic Activities</i>
TTP	<i>Tattiche, Tecniche, Procedure</i>
CoA	<i>Course of Action</i>
BAAS	<i>Breach and Attack Simulation</i>

PAROLE CHIAVE

Resilienza, *Automated Effectiveness Evaluation*, *Kill-Chain Emulation*, *Red Teaming*, *Detection & Response*, CEMA.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Identificativo contratto CatB	B PRJ RT 1079
Amministrazione appaltante:	European Defence Agency
Ente responsabile del progetto:	CY4GATE S.p.A.
Città, Regione:	Roma, Lazio
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Dott.ssa Sara Belluccini
Recapiti del responsabile del progetto:	Via Coponia, 8, 00131 Roma (RM)
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	+39 3926026595
E-mail del responsabile del progetto:	sara.belluccini@cy4gate.com

BIBLIOGRAFIA

- [1] Estay, Daniel A. Sepulveda, et al. “A systematic review of cyber-resilience assessment frameworks.” *Computers & security* 97 (2020): 101996.
- [2] AL-Hawamleh, Ahmad. “Cyber resilience framework: Strengthening defenses and enhancing continuity in business security.” *International Journal of Computing and Digital Systems* 15.1 (2024): 1315-1331.
- [3] Kott, Alexander, and Igor Linkov. “To improve cyber resilience, measure it.” *arXiv preprint arXiv:2102.09455* (2021).
- [4] Landauer, Max, et al. “Red Team Redemption: A Structured Comparison of Open-Source Tools for Adversary Emulation.” *arXiv preprint arXiv:2408.15645* (2024).
- [5] Miller, Doug, et al. “Automated adversary emulation: A case for planning and acting with unknowns.” *MITRE CORP MCLEAN VA MCLEAN* (2018).
- [6] Zilberman, Polina. “SoK: A Survey of Open-Source Threat Emulators.” *arXiv preprint arXiv:2003.01518* (2020).
- [7] MITRE. 2024. Caldera. <https://caldera.readthedocs.io/en/latest/>.
- [8] <https://github.com/guardicore/monkey>.
- [9] <https://redcanary.com/atomic-red-team/>.
- [10] <https://github.com/NextronSystems/APTSimulator>.
- [11] <https://www.picussecurity.com/>.
- [12] <https://go.pentera.io/>.
- [13] Joint Doctrine Note 1/18 Cyber and Electromagnetic Activities.

Il Progetto BIOVET (*Bionics for Veterans*) si inserisce nel contesto dell'accordo bilaterale tra il Ministero della Difesa italiano e il Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti, con l'obiettivo di sviluppare tecnologie robotiche avanzate per la riabilitazione di veterani con disabilità motorie. Il Progetto vede la collaborazione multidisciplinare di molteplici enti/istituzioni/ditte: l'Istituto di Scienze Biomediche della Difesa (ISBD), in particolare il Centro Veterani della Difesa (CVD) e la Sezione di Bioingegneria e *Human Performance*, l'Istituto di Biorobotica della Scuola Superiore Sant'Anna di Pisa (SSSA), con le sue due *spin-off* Prensilia S.r.l. (PRE), Iuvo S.r.l. (IUVO), l'Università degli Studi di Sassari (UNISS) e varie istituzioni statunitensi, tra cui il *Walter Reed National Military Medical Center*, lo *Spaulding Rehabilitation Hospital Boston* e l'*Uniformed Services University of the Health Sciences*. La Fase 1 del progetto ha visto il consolidamento della collaborazione tra istituzioni italiane e statunitensi, la definizione di protocolli sperimentali e lo sviluppo di prototipi per protesi avanzate ed esoscheletri. I risultati preliminari mostrano il potenziale delle tecnologie sviluppate nel migliorare la qualità della vita degli utenti, con prospettive di applicazione nei contesti clinici e operativi futuri.

INTRODUZIONE

Il Progetto BIOVET si inserisce nel contesto della medicina riabilitativa per il recupero delle capacità funzionali, con l'obiettivo di sviluppare e testare tecnologie robotiche innovative per la riabilitazione e il supporto motorio di veterani con disabilità agli arti superiori o inferiori. L'innovazione principale del Progetto risiede nello sviluppo di protesi per l'arto superiore con *feed-back* sensoriale avanzato ed esoscheletri per gli arti inferiori personalizzati per la riabilitazione motoria, superando le limitazioni delle attuali tecnologie disponibili.

Dal punto di vista applicativo, le tecnologie sviluppate in BIOVET hanno una valenza duale, con possibili impieghi sia in ambito militare sia civile. Nei contesti operativi, gli esoscheletri e le protesi avanzate possono essere utilizzati per supportare il recupero fisico di personale militare ferito e facilitare il ritorno al servizio attivo (Cooper et al., 2024). In ambito civile, le soluzioni robotiche possono essere impiegate per la

riabilitazione di pazienti con disabilità motorie dovute a traumi o patologie neurodegenerative, contribuendo così a un significativo avanzamento nel settore della biorobotica e della riabilitazione assistita (Zhang et al., 2023).

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

Le lesioni da combattimento rappresentano una delle principali sfide per la medicina riabilitativa, con conseguenze significative sulla qualità della vita e sulla capacità di reintegro funzionale dei veterani (Barry et al., 2009). Quindi, i veterani con amputazioni e disfunzioni motorie richiedono soluzioni riabilitative avanzate per recuperare funzionalità e autonomia. Il Progetto BIOVET affronta questa sfida sviluppando soluzioni tecnologiche innovative per il recupero motorio, articolandosi in due linee di ricerca principali: FAST (*Fusing Amputation Surgeries with prosthetic Technologies*), che si concentra sullo sviluppo di protesi di arto superiore con

interfacce neuromuscolari avanzate per migliorare il controllo della protesi e ridurre l'affaticamento dell'utente, e BIONICRUS (*Personalized Gait Rehabilitation for Veterans with Wearable Robotic Devices*), dedicata alla creazione di esoscheletri e protesi per migliorare la mobilità degli arti inferiori, adattandosi dinamicamente ai movimenti dell'utente per migliorare la stabilità e ridurre il rischio di cadute. Le soluzioni di BIOVET adottano un approccio multidisciplinare, integrando ingegneria biomedica, neuroscienze e robotica avanzata. Per FAST, le principali innovazioni comprendono lo sviluppo di un'interfaccia miocinetica per il controllo motorio e il *feedback* sensoriale della protesi di mano, basata sull'impianto e il controllo di magneti intra-muscolari. Sono in corso studi sull'usabilità della protesi *Mia Hand* sviluppata da PRE, il polso protesico a doppia rigidità e il *feedback* vibrotattile. Inoltre, è prevista una formazione chirurgica avanzata congiunta tra Italia e Stati Uniti per migliorare le competenze chirurgiche e riabilitative, focalizzandosi sull'implementazione del sistema miocinetico per il controllo della protesi.

Per BIONICRUS, le innovazioni principali includono l'utilizzo di strategie di controllo basate su apprendimento automatico per personalizzare il supporto motorio, la sperimentazione di esoscheletri di nuova generazione, tra cui dispositivi per il supporto dell'anca e di ginocchio, e l'integrazione di algoritmi di ottimizzazione per migliorare l'interazione tra utente e dispositivo, facilitando l'adattamento motorio nel tempo.

METODOLOGIA

Durante la Fase 1 del Progetto, sono stati definiti protocolli sperimentali e sviluppati prototipi funzionali per le due principali linee di ricerca. Nella linea FAST, SSSA ha continuato lo sviluppo dell'interfaccia miocinetica per il controllo motorio e il *feedback* sensoriale delle protesi, con un focus sull'integrazione dei

segnali mioelettrici dell'utente e la biocompatibilità dei materiali. PRE, invece, ha prodotto la protesi *Mia Hand*, che verrà sottoposta a test presso ISBD ed i centri clinici statunitensi partner del Progetto per valutarne l'usabilità in utenti con amputazione di arto superiore. Inoltre, sarà studiata l'efficacia di un polso protesico con rigidità variabile sviluppato da SSSA, al fine di ottimizzare comfort e funzionalità in diversi scenari d'uso. Nella linea BIONICRUS, SSSA e IUVO hanno lavorato allo sviluppo di esoscheletri avanzati per l'anca e il ginocchio, implementando strategie di controllo avanzate e algoritmi predittivi per ottimizzare il supporto motorio durante i movimenti. È stato anche sviluppato un algoritmo per stimare la fase del passo, testato su simulatori biomeccanici e validato con soggetti umani in ambiente controllato. I protocolli per test clinici sono stati definiti in collaborazione con ISBD, UNISS ed i partner statunitensi per la valutazione delle tecnologie in contesti riabilitativi e operativi.

Inoltre, UNISS ha collaborato a stretto contatto con ISBD e la sezione di Bioingegneria per testare i prototipi utilizzando tecniche di analisi del movimento biomeccaniche. Le attività di ricerca sono state condotte seguendo un approccio iterativo, che ha previsto fasi di sviluppo, validazione su modelli sperimentali e ottimizzazione basata sui dati raccolti. La collaborazione tra i partner ha permesso di integrare competenze complementari, massimizzando il potenziale delle tecnologie sviluppate.

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

Le tecnologie sviluppate nel progetto BIOVET offrono un ampio potenziale di applicazione in vari settori. In ambito militare, i dispositivi robotici progettati potrebbero essere utilizzati per supportare la mobilità degli operatori in ambienti critici, come in teatri di guerra o zone ad alto rischio, migliorando la resistenza fisica e riducendo

l'affaticamento durante missioni prolungate. Gli esoscheletri avanzati, in particolare, potrebbero aumentare le prestazioni operative in scenari impegnativi, offrendo un supporto mirato per il trasporto di carichi pesanti e il movimento in condizioni difficili (Farris et al., 2023).

Nel settore clinico, le innovazioni sviluppate potrebbero trasformare la riabilitazione per veterani e civili con amputazioni o deficit motori, migliorando le soluzioni di protesizzazione. L'uso di interfacce neuromuscolari avanzate può consentire un controllo più preciso e naturale delle protesi, facilitando una maggiore accettazione da parte degli utenti e una migliore integrazione nella vita quotidiana (Gherardini et al., 2024). Infine, nell'industria biomedicale, queste tecnologie possono spianare la strada a nuovi dispositivi medicali innovativi. L'introduzione di materiali intelligenti e tecniche di fabbricazione avanzate apre nuove opportunità per la personalizzazione delle soluzioni protesiche e riabilitative, con impatti positivi sulla qualità della vita dei pazienti e sull'efficienza dei trattamenti.

CONCLUSIONI

La Fase 1 del progetto BIOVET ha rappresentato un passo fondamentale nell'avanzamento delle tecnologie per il recupero motorio. L'analisi dello stato dell'arte ha permesso di raccogliere informazioni cruciali sulle tecnologie esistenti, fornendo una base solida per lo sviluppo di protesi ed esoscheletri innovativi. La definizione del *target* di studio e dei protocolli sperimentali ha garantito che le attività future siano mirate e ben strutturate, ottimizzando l'approccio ai gruppi di pazienti e alle tecnologie da testare. I dati sperimentali raccolti nelle prime fasi del progetto hanno offerto indicazioni significative per l'orientamento delle strategie di ricerca, supportando lo sviluppo e la futura validazione delle prime versioni dei prototipi per confermare l'efficacia delle soluzioni proposte. Con il raggiungimento degli obiettivi prefissati, il progetto si prepara a proseguire con la Fase 2, che mira al perfezionamento e all'applicazione delle tecnologie sviluppate in ambito clinico e riabilitativo. Il progetto è ora posizionato in modo ottimale per continuare il suo progresso e affrontare con successo le fasi successive.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

BIOVET	<i>Bionics for Veterans</i>
FAST	<i>Fusing Amputation Surgeries with prosthetic Technologies</i>
BIONICRUS	<i>Personalized Gait Rehabilitation for Veterans with Wearable Robotic Devices</i>
ISBD	<i>Istituto di Scienze Biomediche della Difesa</i>
CVD	<i>Centro Veterani della Difesa</i>
SSSA	<i>Scuola Superiore Sant'Anna di Pisa</i>
PRE	<i>Prensilia S.r.l.</i>
IUVO	<i>Iuvo S.r.l.</i>
UNISS	<i>Università degli Studi di Sassari</i>

PAROLE CHIAVE

Biorobotica, riabilitazione motoria, protesi avanzate, esoscheletri, interfacce neuromuscolari, ottimizzazione personalizzata.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	Non applicabile
Amministrazione appaltante:	Commiservizi
Ente responsabile del progetto:	Istituto di Scienze Biomediche della Difesa
Città, Regione:	Roma, Lazio
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Brig. Gen. Florigio Lista
Recapiti del responsabile del progetto:	Via di Villa Fonseca, 6 00184 Roma (ITALY)
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	+39 06 469141400
E-mail del responsabile del progetto:	direttore@isbd.difesa.it

BIBLIOGRAFIA

Barry SL, Sidel VW. Health effects of combat: a life-course perspective. *Annual review of public health*. 2009; 30:123-136.

Cooper RA, Smolinski G, Candiotti JL, Satpute S, Grindle GG, Sparling TL, Nordstrom MJ, Yuan X, Symsack A, Dae Lee C, Vitiello N, Knezevic S, Sugar TG, Schneider U, Kopp V, Holl M, Gaunaud I, Gailey R, Bonato P, Poropatich R, ... Pasquina PF. Current State, Needs, and Opportunities for Wearable Robots in Military Medical Rehabilitation and Force Protection. *Actuators*. 2024 giugno 24; 13(7).

Farris DJ, Harris DJ, Rice HM, Campbell J, Weare A, Risius D, Armstrong N, Rayson MP. A systematic literature review of evidence for the use of assistive exoskeletons in defence and security use cases. *Ergonomics*. 2023; 66(1):61-87.

Gherardini M, Ianniciello V, Masiero F, Paggetti F, D'Accolti D, La Frazia E, Mani O, Dalise S, Dejanovic K, Fragapane N, Maggiani L, Ipponi E, Controzzi M, Nicastro M, Chisari C, Andreani L, Cipriani C. Restoration of grasping in an upper limb amputee using the myokinetic prosthesis with implanted magnets. *Science robotics*. 2024; 9(94).

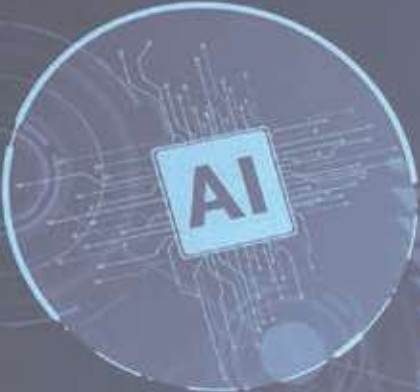
Zhang C, Li N, Xue X, Lu X, Li D, Hong Q. Effects of lower limb exoskeleton gait orthosis compared to mechanical gait orthosis on rehabilitation of patients with spinal cord injury: A systematic review and future perspectives. *Gait & Posture*. 2023; 102:64-71.





RIASSUNTO STATISTICO - FINANZIARIO





RIASSUNTO STATISTICO FINANZIARIO

RIASSUNTO STATISTICO-FINANZIARIO

RIPARTIZIONE DEI FINANZIAMENTI TRA PNRM E PROGRAMMI INTERNAZIONALI

La ripartizione tra progetti del Piano Nazionale della Ricerca Militare (PNRM), progetti in ambito *European Defence Agency* (EDA), progetti derivanti da Accordi Quadro con il settore acca-

demico, attività di ricerca tecnologica dei Centri di Test della Difesa e programmi internazionali (multilaterali e bilaterali) riferita all'anno 2024 è riportata in tabella 1.

Tipologia	n. fasi successive di progetti in corso	nuovi progetti
PNRM	38	21
EDA	0	17
Accordi Quadro	7	3
Centri di <i>Test</i>	4	6
BI-MULTILATERALI	6	7

Tabella 1 - Ripartizione dei mandati effettuati nel 2024.

RIPARTIZIONE DEI FINANZIAMENTI NAZIONALI PER AREE CAPACITIVE/TECNOLOGICHE

La ripartizione annuale dei finanziamenti nazionali per aree capacitive/tecnologiche può variare sulla base delle priorità operative espresse in ambito Difesa.

I progetti nazionali per l'anno 2024 sono stati selezionati in base ai criteri stabiliti nell'atto di indirizzo del Ministro della Difesa ed aggiornati dal Capo di Stato Maggiore della Difesa, privilegiando le proposte di progetto attinenti ai seguenti cluster applicativi/tecnologici:

- **C2 e Multi-Domain situation awareness:** soluzioni in grado ricevere, fondere e rappresentare in maniera integrata i dati provenienti da sensori e sistemi militari appartenenti ai cinque Domini Operativi (terrestre, marittimo, aereo, cibernetico e spaziale), *Intelligence Surveillance & Reconnaissance* (ISR)
- **Tecnologie spaziali:** difesa assetti, *Military Satellite Communications* (MILSATCOM), Osservazione della Terra, accesso allo spazio, *Space Domain Awareness* (SDA), *In-Orbit Servicing*, Sorveglianza spettro elettromagnetico, piattaforme stratosferiche
- **Tecnologie cyber:** soluzioni per il conseguimento di capacità di *awareness*, di difesa e di attacco nel dominio cibernetico
- **Protezione e potenziamento capacità del soldato:** *human enhancement*, *awareness*, difesa e offesa, riduzione degli effetti negativi delle infermità
- **Sistemi Autonomi:** tecnologie per lo sviluppo e il contrasto dei *Robotic Autonomous Systems*, *Unmanned Systems* (UxV)
- **Soluzioni di Intelligenza Artificiale:** gestione dei *big data* e standardizzazione di dati eterogenei (es. sensori, sistemi e *database*), automazione complementare dei sistemi a guida remota in ambiente EM non permissivo, *swarm intelligence*, *targeting* di precisione
- **Contrasto minacce "emergenti":** armi ad energia diretta (incluso sviluppo capacità offensiva), armi in grado di garantire l'accesso ad aree protette da sistemi *Anti-Access/Area Denial* (A2/AD) ovvero *counter-A2/AD*, attività *Cyber* combinate con azioni di Guerra Elettronica (*Cyber ElectroMagnetic Activities*), armi ipersoniche
- **Underwater:** tecnologie per il controllo della

dimensione subacquea e per l'efficacia operativa dei mezzi e dispositivi che vi operano

- **Urban warfare:** tecnologie per il controllo del territorio urbano e per l'efficacia operativa dei mezzi e dispositivi militari che vi operano
- **Sostenibilità, sicurezza e resilienza energetica:** soluzioni per la riduzione del *footprint* logistico, ambientale, sicurezza ed efficientamento energetico delle infrastrutture e dei mezzi militari (*smart building, Nearzero Energy Building, strutture campali, biocarburanti e propulsioni ibride, storage, fonti energetiche rinnovabili in ambito militare, energy management system e diversificazione sistemi di approvvigionamento*)

- **Bio tecnologie** (Bioinformatica, Biosensori e Bioelettronica), **smart materials e nano tecnologie**, potenziamento e sviluppo delle capacità di difesa **CBRN**

L'individuazione dei *cluster* prioritari ha consentito una programmazione e gestione più efficace ed efficiente delle risorse, indirizzando le attività di ricerca tecnologica al raggiungimento di obiettivi coerenti con le esigenze capacitive e le attuali priorità delle Forze Armate e minimizzando la frammentazione dei settori tecnologici e la dispersione delle risorse su molteplici e diversificate attività, non tutte specificamente indirizzate a colmare i *gap* capacitivi individuati a livello operativo.

Area Tecnologica (<i>cluster</i>)	% finanziamento	Numero progetti
C2 e Multi-Domain situation awareness	9,5%	2
Tecnologie spaziali	33,3%	7
Tecnologia <i>cyber</i>	4,8%	1
Protezione e potenziamento capacità del soldato	9,5%	2
Sistemi Autonomi	4,8%	1
Soluzioni di Intelligenza Artificiale	4,8%	1
Contrasto minacce "emergenti"	9,5%	2
<i>Underwater</i>	14,3%	3
<i>Urban warfare</i>	0,0%	0
Sostenibilità, sicurezza e resilienza energetica	4,8%	1
Biotecnologie	4,8%	1
TOTALE	100%	21

Tabella 2 - Ripartizione dei nuovi progetti nazionali avviati nel 2024 rispetto ai *cluster* capacitivi/tecnologici prioritari indicati dal Capo di Stato Maggiore della Difesa.

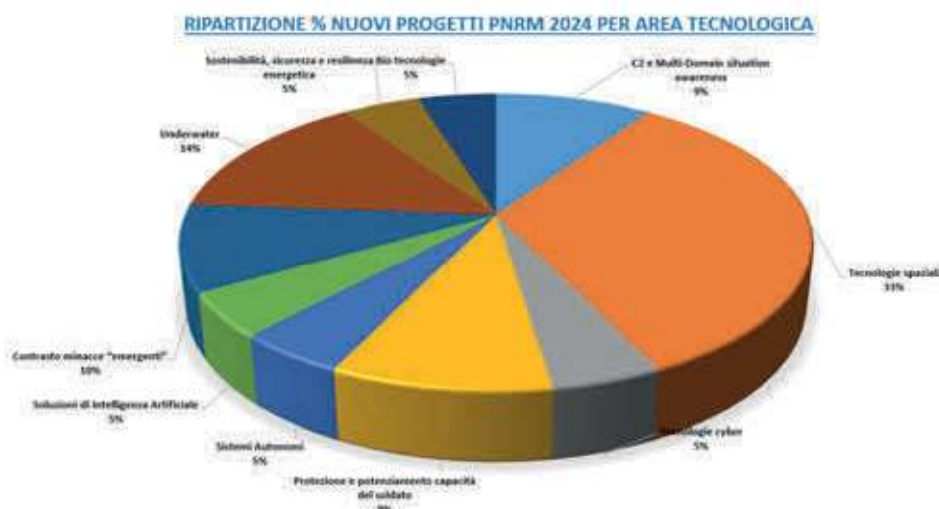


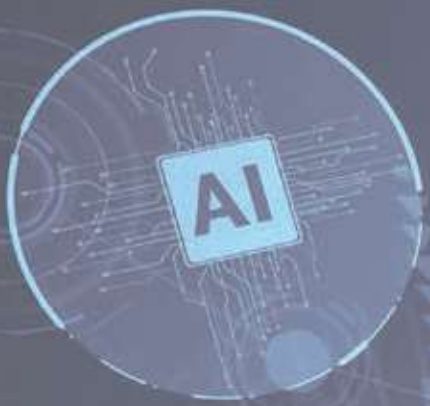
Figura 1 - Ripartizione dei nuovi progetti nazionali avviati nel 2024 rispetto ai *cluster* capacitivi/tecnologici prioritari indicati dal Capo di Stato Maggiore della Difesa.





SIGLE E ACRONIMI





SIGLE E ACRONIMI

2-MF	Multi-Functional Modular Frame
AD	Amministrazione Difesa
AES	Advanced Encryption Standard
ALW	Airborne platform effects on laser systems and warning sensors
AODV	Ad Hoc On-Demand Distance Vector
AU	Actuation Unit
BEE DDS	Implementazione Leonardo dello standard DDS
BER	Bit Error Rate
BFN	Beam-Forming Network
BLOS	Behind Line Of Sight
C2	Comando & Controllo
CDMA	Code Division Multiple Access
C4ISTAR	Command, Control, Communications, Targeting Acquisition and Reconnaissance
CIRA	Centro Italiano Ricerche Aerospaziali
CPA	Sistema Cooperativo basato su Percezione Aptica
COFDM	Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing
CMC	Materiale Composito a Matrice Ceramica
C/SiC	Composito con matrice di SiC rinforzato con fibre di Carbonio
COTS	Commercial Off-the-Shelf
CSM	Communication Spectrum Monitoring
CU	Control Unit
DIRCM	Directed Infrared Countermeasure
DDS	Data Distribution Service
DF	Direction Finding
DM	Directional Modulation (Modulazione Direzionale)
DT	Dimostratore Tecnologico
DVB-T	Digital Video Broadcasting-Terrestrial
EMI	ElectroMagnetic Interference
ESM	Electronic Support Measures
EFT	Electronic Functional Tray
ETSI	European Telecommunication Standards Institute
ELINT	Electronic INTelligence
EM	Engineering Model
E2E	End-to-End
EGSE	Electrical Ground Support Equipment
EDA	European Defence Agency

ENIVD	(European Network for Diagnostics of “Imported” Viral Diseases)
EOT	Energy on Target
FM	Flywheel motor
GHIBLI	Galleria la plasma da due MW presso il CIRA
GUI	Graphical User Interface
GFT	Geometric Functional Tray
GIM	Gimbal motor
GIS	Geographic Information System
GPS	Global Positioning System
GPU	Graphical Processing Unit
GEOINT	GEOspatial INTelligence
HfB2	Diboruro di Afnio
IDS	Intrusion Detection System
INS	Inertial Navigation System
ISR	Intelligence Surveillance and Reconnaissance
It-MoD	Italian Ministry of Defense
IMINT	Image INTelligence
ISL	Inter Satellite Link
IR	Infrarosso
J/S	Jammer-to-Signal ratio
LEO	Low Earth Orbit
LC	Load Case
LT CES	Communication Electronic Support Measures
LICOLA	Low Interceptable Communication Link Antennas
MCMG	Mini Control Momentum Gyroscope Assembly
MAC	Medium Access Control
MALE	Medium Altitude Long Endurance
MANET	Mobile Ad-hoc Networks
MCS	Mission Control System
MS-DEP	Multi-Sensor Data Exploitation Platform
MWS	Missile Warning System
NEC	Network Enabled Capability
NCS	Network Control System
OBL	Optical Break Lock
OMG	Object Management Group
OTW	Other Than War

OBP	On-Board Processing
PCR	(Polymerase Chain Reaction)
POC	Posto Operatore Centralizzato
P/F	Piattaforma
P/L	Payload
POI	Point Of Interest
RMSE	Root Mean Square Error
RIFON	Rete Interforze in Fibra Ottica Nazionale
RPAS	Remotely Piloted Air System
RSV	Reparto Sperimentale di Volo
SATCOM	Satellite Communication
S/C	Spacecraft
SIMP	Solid Isotropic Material with Penalisation
SHF	Super High Frequency
SIC	Carburo di Silicio
SICRAL	Sistema Italiano per Comunicazioni Riservate ed Allarmi
SiC/SiC	Composito con matrice di SIC rinforzato con fibre di SIC
SOTA	State Of The Art
TA	Technical Arrangement
TAPR	Aeromobile a Pilotaggio Remoto
TAS-I	Thales Alenia Space Italia
TAKS	Topology Authenticated Key Scheme
TRL	Technology Readiness LevelDMA
TRM	Traffic Resource Manager
TRM-DB	TRM Data Base
UV	Ultra Violetto
UHF	Ultra High Frequency
VANET	Vehicular Ad-Hoc Networks
VFT	Volumetric Functional Tray
VHF	Very High Frequency
WP	Work Package
WIFI	Wireless Fidelity
WIDS	WPM-based Intrusion Detection System
WSN	Wireless Sensor Network
WHO	(World Health Organization-Organizzazione Mondiale della Sanità)
ZrB2	Diborure di Zirconio

RECAPITI EDITORIALI

PROGETTO, COORDINAMENTO GENERALE ED EDITORIALE

III Reparto - Innovazione Tecnologica, 1° Ufficio

Col. ing. Marco AGABITI

C.F. Marco MARCHI

1° Lgt. Nicola LA NEVE

Ass. Amm.vo Flavia TOFONE

SUPERVISIONE E COORDINAMENTO TECNICO-SCIENTIFICO

Col. ing. Marco AGABITI

C.F. Marco MARCHI

COMITATO SCIENTIFICO DI REDAZIONE

Col. ing. Marco AGABITI

Col. ing. Giovanni SEMBENINI

Ten. Col. Francesco BARTOLOZZI

Magg. ing. Bruno DI PALMA

Ten. Col. ing. Antonio PALERMO

Magg. ing. Antonino GULIZIA

C.F. Marco MARCHI

Ten. Col. GArn Giuliano CIOCCOLO

SEGRETERIA DI REDAZIONE

1° Lgt. Nicola LA NEVE

Ass. Amm.vo Flavia TOFONE

1° Lgt. Marco BONANNI

Ass. Amm.vo Alessandra SCOTTI

Grd. Aiut. Antonino SUTERA

STAMPA

Teraprint.it - Roma

