DRONI E TECNOLOGIE QUANTISTICHE:
NUOVE MINACCE E NUOVE SFIDE PER LA DIFESA

Memoria depositata in occasione dell'audizione presso la Commissione IV (Difesa) della Camera dei Deputati, nell'ambito dell'indagine conoscitiva sulle tecnologie quantistiche nel settore della difesa e della sicurezza

Roma, 21 ottobre 2026

Ing. Daniele Pavarin, CEO T4i – Technology for Propulsion and Innovation S.p.A.

Onorevoli Deputati,

È per noi un privilegio poter incontrare questa Commissione e portare il nostro contributo ad un'indagine conoscitiva di cruciale importanza per il nostro Paese, in un contesto di forte e instabile evoluzione geopolitica. Lasciatemi dunque ringraziare in maniera non formale il Presidente e Voi membri della Commissione.

Vorrei in premessa inquadrare il problema dell'evoluzione delle tecnologie quantistiche come fattore di trasformazione delle future minacce rappresentate dai droni e da altri aerei senza pilota, soffermandomi poi sulle soluzioni rappresentate da architetture difensive resilienti, multilivello ed economicamente sostenibili. T4i – Technology for Propulsion and Innovation, è una PMI italiana specializzata nello sviluppo di sistemi propulsivi per applicazioni aerospaziali e della difesa. Fondata nel 2014 a partire dal gruppo di ricerca sulla propulsione spaziale dell'Università di Padova, l'azienda sviluppa competenze nella progettazione, realizzazione e sperimentazione di motori a propulsione ibrida per impieghi in ambito civile e militare.

IL PROBLEMA

La crescente diffusione di minacce aeree a basso costo, producibili in grandi quantità e accessibili a numerosi attori statali e non, sta mettendo sotto enorme pressione gli attuali sistemi di difesa aerea.

Ne è un esempio lampante il conflitto in Ucraina, dove entrambi gli avversari stanno attuando estese campagne aeree strategiche tramite l'uso ripetuto di grandi sciami di droni a lungo raggio.

Altro esempio è il conflitto con l'Iran, dove nonostante la supremazia aerea americana, Teheran è riuscita ad infliggere danni ingenti ai paesi del Golfo e agli stessi apparati americani presenti in zona. Inoltre, l'impossibilità da parte americana di eliminare completamente la minaccia dei droni ha permesso all'Iran di tenere in scacco il mondo tramite la chiusura indiretta dello stretto di Hormuz, possibile anche senza il controllo diretto marittimo.

Infine, sono in aumento gli sconfinamenti di droni in territorio europeo e NATO nel fronte orientale (Baltici, Polonia, Romania), compresi i due recenti abbattimenti da parte dei caccia dell'Aeronautica Militare Italiana dispiegati in Lituania.

I droni a lungo raggio, nonostante il costo ridotto, possono raggiungere livelli di sofisticazione tecnologica talvolta anche relativamente elevati, rendendo sempre più difficile il loro contrasto. Il modello più famoso e più impiegato da Russia ed Iran è lo Shahed-136 (Geran-2 per i russi) che ha una velocità approssimativa pari a circa 200 km/h a quote di volo di qualche chilometro. Il costo stimato è tra i 20.000 e i 100.000 dollari, in base alla versione. Questo va comparato ai 2-4 milioni di dollari di costo di un missile intercettore Patriot o Aster-30 (usato nel sistema italo-francese SAMP/T), rendendo il *cost exchange* totalmente insostenibile.

Gli Stati Uniti incrementeranno la produzione di Patriot dagli attuali 650 all'anno a 2000 entro l'anno 2030. La produzione di Aster-30 dovrebbe superare i 300 esemplari all'anno nel 2028, con un tempo di

produzione di 18 mesi al pezzo. Numeri totalmente fuori scala con la capacità russa di produrre svariate migliaia di Geran-2 al mese e di lanciare attacchi simultanei con centinaia di velivoli a notte contro obiettivi distribuiti su vaste aree.

Inoltre, insieme ai Geran-2, i russi impiegano anche il drone Gerbera, un "cugino" molto più piccolo ed economico. La struttura del drone è realizzata principalmente in schiuma plastica (polistirolo) e compensato, con un costo di produzione stimato in appena 10.000 dollari (circa un decimo rispetto a un drone d'attacco standard). La sua funzione principale è quella di esca (Decoy): non trasporta esplosivo, serve unicamente a imitare la firma radar di un Geran-2 più grande, spingendo la contraerea nemica a sprecare costosi missili intercettori.

Durante l'operazione Epic Fury, il costo complessivo stimato del migliaio circa di missili intercettori sparati solo nei primi 4 giorni è stato di 1,7 miliardi di dollari[1], non riuscendo comunque a prevenire danni a installazioni militari (come gli apparati radar di allarme precoce AN/FPS-132 a Doha) e civili (raffinerie Kuwait Petroleum Corporation e Saudi Aramco, e successivamente impianto di gas naturale di Ras Laffan, in Qatar, critico anche per l'Italia), oltre che ad aerei colpiti a terra (e.g. AWACS E-3 Sentry, rifornitori KC-135 in Arabia Saudita).

L'Italia ha avviato un piano di investimenti e ha già iniziato a ricevere i primissimi sistemi SAMP/T NG (New Generation). L'obiettivo stimato della Difesa italiana nel prossimo futuro è di acquisire 9 sistemi Grifo dotati dei missili CAMM-ER[2] e 10 batterie SAMP/T NG[3]. Per confronto, nei primi quattro giorni di Epic Fury, Stati Uniti e paesi del golfo schieravano tra le 35-45 batterie[4] (principalmente Patriot e una decina di THAAD) e hanno lanciato circa un migliaio di missili intercettori[5].

I droni sopra citati hanno autonomie dell'ordine di 1000-2000 km, sono dotati di navigazione inerziale e satellitare, possono effettuare voli complessi in formazione pre-programmati e colpire obiettivi prefissati. La combinazione di grandi numeri, lunga portata, ridotta segnatura radar/termica e capacità operative avanzate consente inoltre di effettuare attacchi da molteplici direzioni, ingannando, circumnavigando e saturando le difese disponibili. Per riferimento uno sciame di droni Shahed potrebbe tranquillamente colpire Taranto, Roma, la Spezia e perfino Milano partendo dalla Libia ed arrivando da direzioni diverse. La distanza tra la Crimea e l'Italia è anch'essa tra i 1500 e i 2000 km.

---

[1] **Center for Strategic and International Studies (CSIS)**, in un'analisi pubblicata il 5 marzo 2026 da Mark F. Cancian e Chris H. Park

[2] Dossier n° 117 del Senato della Repubblica XVIII legislatura

[3] Dichiarazione del ministro della Difesa Guido Crosetto riportata da ANSA nel settembre 2024,
Bollettino delle Giunte e delle Commissioni parlamentari n. 634 del 19 febbraio 2026

[4] **Center for Strategic and International Studies (CSIS)**, in un'analisi pubblicata il 20 settembre 2026 da Hannah Miller

[5] **Center for Strategic and International Studies (CSIS)**, in un'analisi pubblicata il 21 aprile 2026 da Mark F. Cancian e Chris H. Park

I modelli di droni più avanzati possono utilizzare sistemi autonomi di identificazione e acquisizione bersagli grazie all'utilizzo dell'intelligenza artificiale, incrementando la probabilità di successo, la sopravvivenza e la flessibilità operativa. Alcuni Geran-2 di produzione recente sono dotati di sistemi basati su intelligenza artificiale per abilitare la visione artificiale, le regolazioni di volo autonome e il tracciamento dei bersagli in movimento durante la fase terminale.
Le dimensioni relativamente ridotte (3 m per 200 kg circa) e la limitata logistica di supporto rendono facile agli attaccanti il rimanere nascosti, procedere rapidamente al lancio per poi tornare nell'ombra, rendendo molto difficile l'attività di contrasto e prevenzione attiva, come visto appunto in Yemen ed Iran.
Inoltre, anche la produzione e la catena di approvvigionamento di questi droni possono essere disperse e rese resilienti ad attacchi e sanzioni, grazie all'utilizzo di architetture semplici ed aperte, design modulari, componenti commerciali o addirittura "fatti in casa".

SVILUPPI RECENTI DEI SISTEMI DI GUIDA, NAVIGAZIONE E COMUNICAZIONE DEI DRONI D'ATTACCO

L'evoluzione dei droni d'attacco della famiglia Geran, impiegati dalla Russia e derivati originariamente dalla piattaforma iraniana Shahed, rappresenta un esempio significativo della recente e rapida trasformazione dei sistemi aerei senza pilota da piattaforme relativamente semplici, basate su navigazione satellitare e rotte preprogrammate, a sistemi potenzialmente più autonomi, interconnessi e capaci di elaborare informazioni in tempo reale, anche grazie alle nuove tecnologie quantistiche.
La prima generazione di questi sistemi si basava principalmente sulla navigazione inerziale (INS), integrata con segnali satellitari GNSS, per seguire traiettorie prestabilite. Questa architettura permetteva un funzionamento relativamente economico e con limitata necessità di comunicazione continua. Nel tempo sono state riportate modifiche ai ricevitori satellitari e all'elettronica di bordo, anche in risposta alla crescente diffusione delle tecniche di disturbo (*jamming*) e falsificazione (*spoofing*) dei segnali di navigazione.
Una seconda fase evolutiva riguarda l'introduzione di sistemi di comunicazione più articolati. Su alcune varianti sono stati segnalati componenti riconducibili alle reti cellulari, come modem e schede SIM, potenzialmente utilizzabili per trasmettere dati diagnostici, informazioni di stato o aggiornamenti. Le reti 4G/LTE e, in prospettiva, 5G offrono un'infrastruttura di comunicazione già esistente, ma la loro disponibilità dipende dalla copertura territoriale, dalla compatibilità delle reti e dalle condizioni operative. Parallelamente, la comunicazione satellitare (con costellazioni come Starlink) costituisce un possibile ambito di evoluzione per piattaforme aeree senza pilota, grazie alla possibilità di mantenere collegamenti anche al di fuori delle infrastrutture terrestri.
Un ulteriore sviluppo tecnologico è rappresentato dalle antenne per reti mesh, nelle quali diversi nodi possono scambiarsi informazioni attraverso collegamenti radio distribuiti. Il principale vantaggio è la possibilità di realizzare reti decentralizzate, nelle quali la disponibilità delle informazioni non dipende

necessariamente da un unico nodo di comunicazione. In questo modo i droni possono comunicare tra loro fino a riportare il segnale al punto di origine. Se un nodo viene distrutto la rete si riaggiusta seguendo un percorso diverso all'interno dello sciame di droni.

La terza direttrice di evoluzione riguarda i sistemi di visione e l'intelligenza artificiale. L'integrazione di telecamere elettro-ottiche, sensori infrarossi e processori dedicati all'elaborazione delle immagini può consentire a un drone di interpretare l'ambiente circostante, riconoscere caratteristiche del terreno e supportare funzioni di navigazione autonoma. Algoritmi di computer vision, *machine learning* e *sensor fusion* permettono di combinare dati provenienti da telecamere, sensori inerziali e sistemi satellitari, migliorando la consapevolezza situazionale, la gestione delle anomalie e il *targeting* degli obiettivi.

Tutto questo è avvenuto nell'arco di pochissimi anni e dimostra come nella fase attuale si sia instaurato un ciclo continuo di adattamenti da entrambe le parti che rende quindi le soluzioni obsolete anche solo dopo pochi mesi, e permette un'evoluzione accelerata di nuove tecnologie.

L'evoluzione delle tecnologie quantistiche rappresenterà un importante fattore di trasformazione delle future minacce aeree senza pilota. Lo sviluppo di nuove capacità di navigazione, sensoristica e sincronizzazione consentirà a piattaforme autonome di operare con una dipendenza sempre minore dai sistemi satellitari e dai collegamenti esterni, mettendo progressivamente in discussione l'efficacia di alcune contromisure tradizionali.

LA POSSIBILE EVOLUZIONE ATTRAVERSO LE TECNOLOGIE QUANTISTICHE

Nel medio-lungo periodo, le tecnologie quantistiche introdurranno cambiamenti importanti nell'avionica e nei sistemi di navigazione delle piattaforme aeree autonome. Ciò amplierà progressivamente le prestazioni e l'affidabilità di capacità che già esistono, creando ulteriori esigenze di resilienza difensiva. La prospettiva più concreta è rappresentata dal *quantum sensing*, cioè dall'impiego di fenomeni quantistici per realizzare sensori di elevata sensibilità e precisione. Tra questi vi sono accelerometri e giroscopi atomici, che contribuiranno allo sviluppo di sistemi di navigazione inerziale con caratteristiche superiori rispetto ai dispositivi convenzionali. Anche magnetometri e gravimetri quantistici sono oggetto di ricerca per applicazioni di misura e navigazione. Di seguito una breve descrizione delle varie tipologie:

1. **Quantum inertial sensing**

Utilizza interferometri atomici per misurare accelerazioni e, con opportune architetture, rotazioni. Permette di sviluppare accelerometri e giroscopi quantistici destinati ai sistemi di navigazione inerziale.

2. **Quantum gravimetry**

Misura piccolissime variazioni del campo gravitazionale terrestre. Con mappe gravitazionali di riferimento, può contribuire a stimare la posizione anche in assenza di GNSS.

3. **Quantum magnetometry**

Sfrutta sensori atomici o difetti quantistici nei diamanti, come i centri NV, per misurare il campo magnetico. Le anomalie magnetiche del territorio possono diventare riferimenti di navigazione.

4. Quantum clocks

Gli orologi atomici offrono riferimenti temporali estremamente stabili, importanti per la sincronizzazione e per sistemi di navigazione basati su misure di tempo e distanza.

Il principale problema dei sistemi di navigazione tradizionale è il *drift* nel tempo, che porta il sistema a sbagliare la determinazione della propria posizione con un errore che si amplifica nel tempo e quindi con la distanza percorsa. Sistemi più piccoli ed economici tendono a essere più imprecisi, mentre i più sofisticati sono maggiormente ingombranti e costosi. Per questo motivo sulle lunghe distanze è necessario aggiornare la posizione corretta tramite sistemi satellitari GNSS. I sistemi quantistici hanno il potenziale di permettere la navigazione precisa per distanze lunghissime (migliaia di km) senza necessità di aggiornamenti esterni e quindi insensibile a *jamming* e *spoofing*. In questo modo i droni saranno in grado di essere completamente autonomi e quindi di poter essere fermati solo tramite distruzione cinetica. La protezione dovrà essere economicamente sostenibile, disponibile in quantità adeguate e basata su più livelli difensivi. **In questo scenario si inserisce l'interesse per lo sviluppo e la valutazione di effettori convenzionali a basso costo, comprese soluzioni basate sulla propulsione ibrida, quale possibile contributo alla realizzazione di una difesa antidrone scalabile.**

Un secondo ambito è la *quantum communication*. Tecniche come la distribuzione quantistica delle chiavi (QKD) permettono, in determinate condizioni, di rilevare tentativi di intercettazione durante lo scambio di materiale crittografico. Non si tratta però di comunicazioni impossibili da disturbare, né di una sostituzione diretta delle reti radio, cellulari o satellitari tradizionali. Ciononostante, la tecnologia quantistica permetterà un incremento della resilienza dei sistemi di comunicazione dei droni d'attacco a lungo raggio.

In conclusione, la rapida evoluzione dei droni evidenzia una tendenza più ampia verso la convergenza tra navigazione satellitare, comunicazioni digitali, sensori ottici ed elaborazione intelligente. Le tecnologie quantistiche rappresentano una possibile fase successiva, soprattutto per la sensoristica e la sicurezza delle informazioni. Esse aumenteranno ulteriormente alcune capacità di navigazione, sincronizzazione e resilienza, riducendo l'efficacia di determinate misure di contrasto.

La necessità di difese sostenibili esiste già oggi, e il progresso quantistico può renderla ancora più rilevante. Diventa quindi strategico studiare architetture difensive resilienti, multilivello ed economicamente sostenibili, accompagnate da nuove capacità industriali di produzione.

CONTRASTO

Le contromisure attuali a tali minacce presentano tutte importanti limiti, di fatto non esiste al momento una soluzione olistica che soddisfi tutte le necessità d'impiego.

Il mercato dei sistemi anti-drone è in enorme fermento, lo dimostrano molte iniziative sia pubbliche che private. Si stima che il mercato globale dei sistemi Counter-UAS[6] passerà da un valore compreso tra 4,5 e 6,6 miliardi di dollari nel 2025 a un valore compreso tra 14,5 e 20,3 miliardi di dollari entro il 2030[7]. Negli ultimi anni in Gran Bretagna, Francia, Germania ed altri paesi europei soprattutto del fianco Est sono nate svariate start-up che hanno raccolto investimenti significativi. Un esempio tipico è la francese Alta Ares che ha raccolto 50 milioni di euro da fondi di investimento per industrializzare e accelerare la diffusione delle sue tecnologie. Un altro esempio famoso riguarda l'azienda inglese Cambridge Aerospace, fondata alla fine del 2024 nel Regno Unito, che ha raccolto oltre 130 milioni di dollari di finanziamenti.

La difesa più economica è costituita dai cosiddetti sistemi soft-kill (e.g. *jamming, spoofing*, attacco cyber) che interferiscono con l'elettronica del drone. Una criticità di questo approccio riguarda il fatto che il drone potrebbe comunque schiantarsi arrecando danni ingenti seppur non sull'obiettivo primario. Inoltre, queste soluzioni non sono sempre efficaci contro le piattaforme più avanzate dotate di elettronica resistente, navigazione autonoma e riconoscimento bersagli basato su intelligenza artificiale, un settore, come noto, in velocissima espansione.

Per avere la certezza di fermare un drone di qualunque tipo, inclusi i più resistenti alle contromisure elettroniche, è necessario procedere con l'abbattimento cinetico (*hard-kill*).

Una soluzione economica riguarda le armi leggere a guida automatica che però hanno *range* ridottissimi e possono fornire solo una limitata difesa di prossimità. In compenso cannoni più grandi e sofisticati come quelli del sistema tedesco Gepard usato in Ucraina (sostituito in produzione dai modelli più attuali Rheinmetall Skynex e Skyranger) o la famiglia Hystrix recentemente sviluppata dall'industria nazionale possono raggiungere distanze ed efficacia ben maggiori. Il costo per abbattimento è di qualche migliaio di euro. Tuttavia, questi sistemi hanno un costo della piattaforma di svariati milioni di euro e non sono prodotti in largo numero, quindi sono utili solo per la difesa di obiettivi specifici e non garantiscono copertura globale. Inoltre, possono essere distrutti in attacchi mirati con tattiche di saturazione e/o da armi più tradizionali di classe superiore come missili balistici o da crociera, con conseguente, ingente perdita economica e di capacità operativa.

Caratteristiche simili presentano le armi a energia diretta (laser e microonde), infatti il costo per abbattimento risulta ancora inferiore a scapito di un costo della piattaforma sempre molto elevato, un *range* ancor più limitato e di un'inferiore maturità tecnologica che li rende meno efficaci ed affidabili dei precedenti cannoni automatici. Il laser è molto sensibile alle condizioni ambientali e richiede molto tempo (svariati secondi) per l'abbattimento di oggetti relativamente piccoli a breve distanza, risultando quindi molto vulnerabile alla saturazione da parte di attacchi di sciami di droni. I sistemi a microonde colpiscono

[6] *Anti-Drone Market*, pubblicato nel giugno 2025 da **MarketsandMarkets**

[7] *Counter-Unmanned Aircraft System (C-UAS) Market Outlook 2030*, pubblicato nel maggio 2026 da **MarketsandMarkets**,

più droni contemporaneamente ma possono indurre danni collaterali nella direzione di emissione, inoltre droni veloci e schermati che picchiano all'ultimo momento da quote più alte e direzioni diverse possono essere maggiormente immuni a questo tipo di soluzione.

La ricetta largamente di maggior successo in Ucraina è l'utilizzo di droni intercettori elettrici a quattro eliche autoprodotti come i modelli Skyfall P1-Sun, Wild Hornets Sting e ODIN Win_Hit. Questi sistemi hanno un costo di migliaia di euro, raggiungono velocità di 150-450 km/h, possono volare per una ventina di km, possono essere dotati di una piccola carica esplosiva (<1 kg) o addirittura agire per solo impatto cinetico. Possono essere prodotti in decine di migliaia al mese per tener il passo con la produzione dei droni Geran-2. La guida è ibrida, utilizzando un sistema manuale FPV (*First Person View*) assistito dall'intelligenza artificiale soprattutto nella fase terminale. Attualmente le Forze Armate ucraine dichiarano un tasso di successo negli abbattimenti tra il 90 e il 95%.

L'Ucraina ha offerto supporto ai paesi del Golfo durante la guerra con l'Iran ed inoltre molte nazioni europee stanno portando avanti con loro piani di sviluppo e produzione congiunta di queste nuove tecnologie più scalabili e sostenibili. Tuttavia, un problema riguarda la manodopera impiegata da questi sistemi: attualmente per ogni drone intercettore è necessario un operatore altamente addestrato che lo piloti. Questo implica che in Ucraina vi siano ormai intorno a 80.000 persone coinvolte nei programmi dei droni di vario tipo, inclusi 40.000 piloti di droni attivi in combattimento (pari all'intera Aeronautica Militare Italiana), cosa assolutamente non scalabile nel contesto italiano e di molte altre nazioni attualmente non in guerra con forze armate basate su volontari.

Un altro problema è la geometria d'intercetto, dagli innumerevoli video pubblici si vede come l'intercettazione avvenga dal quadrante posteriore, questo per ridurre la velocità relativa e rendere il pilotaggio manuale più semplice e preciso. Ciò comporta che il drone intercettore sia più veloce di quello intercettato, ed inoltre aumenta i tempi di risposta e riduce le zone di ingaggio efficaci.

Potenzialmente, l'utilizzo dell'intelligenza artificiale dovrebbe poter ridurre sensibilmente queste criticità nel futuro, ma al momento è un processo ancora distante da adeguato compimento.

I russi si stanno adattando in vari modi a questa aumentata inefficacia dei loro droni standard utilizzati finora, primo tra tutti quello di sviluppare nuovi modelli più difficili da intercettare. Si parla dei Geran-3 che sostituiscono il motore ad elica del Geran-2 con un turbogetto di origine cinese. Si tratta di un modello di transizione che è stato ben presto sostituito da una versione più ottimizzata chiamata Geran-4, con una struttura più resistente e aerodinamica. Un modello completamente diverso, sempre propulso da un turboreattore è il Geran-5 che abbandona la configurazione originale triangolare per un layout simile a quello di una bomba volante V1 della Seconda guerra mondiale, diventando praticamente un missile da crociera a basso costo. Questi sistemi volano a quote (oltre 7000 m) e velocità (fino a 600 km/h) che rendono molto più difficile l'intercettazione con i sistemi descritti in precedenza, e difatti i dati sulle intercettazioni recenti parlano di un tasso generale di abbattimento sceso intorno al 60%, il che significa che centinaia di droni sono di nuovo in grado di oltrepassare le difese in una singola notte di attacchi. Questi nuovi sistemi sono più sofisticati e costosi dei precedenti e sono prodotti in numeri inferiori (pur

sempre migliaia), ma il loro tasso di successo superiore rende il risultato finale più efficace, tanto che i russi stanno ribilanciando la produzione per avere quote sempre maggiori di quest'ultimi.
In un continuo ciclo iterativo sono già allo studio in Ucraina ed altri paesi Europei (soprattutto Gran Bretagna, Francia, Germania, Baltici) nuovi modelli di droni intercettori in grado di volare a velocità più elevate, sia affinando i design attuali, sia passando a modelli che utilizzino a loro volta la propulsione a getto o a razzo per raggiungere velocità e quote ancora maggiori. È degno di nota sottolineare come sia l'offesa che la difesa stiano recentemente incrementando di complessità e costo, pur rimanendo però a livelli totalmente diversi da quelli dei sistemi tradizionali e mantenendo numeri di produzione elevatissimi.
Negli Stati Uniti esistono già sistemi a getto che possono essere impiegati contro questi tipi di droni ed alcuni sono già stati dispiegati in Medio Oriente. Due esempi importanti sono il Coyote Block 2 di Raytheon e il Roadrunner di Anduril. Il primo, lanciato da razzi di accelerazione e dotato di un turbogetto di sostentamento, ha una velocità massima dichiarata di 555 km/h, un *range* effettivo di 10-15 km, una guida basata su *datalink* da terra più sensore interno di acquisizione per la fase terminale di ingaggio. Viene accreditato di oltre 600 abbattimenti in combattimento. Il costo si aggira intorno ai 120.000 dollari, quindi decisamente inferiore ad un Patriot, e la produzione dovrebbe salire a 300 esemplari al mese. Si tratta però di valori ancora distantissimi dalle soluzioni discusse in precedenza.
Il Roadrunner, dotato di due turbogetti per il decollo/atterraggio verticale e il volo in crociera, è più grande, pesante e veloce (1200 km/h), risultando ancora più costoso seppur sia riutilizzabile in caso di non distruzione. Prestazioni e risultati reali sull'impiego operativo non sono ancora disponibili, però il sistema ha ricevuto un contratto da parte del Pentagono pari a 250 milioni di dollari per 500 intercettori (quindi un valore lordo di 500 mila dollari al pezzo).
L'unica altra opzione efficace rimasta per abbattere potenzialmente droni di ogni tipo di taglia e prestazione è quella dell'utilizzo di missili, in grado di raggiungere quote e velocità superiori a quelle di qualunque altro mezzo.
Tuttavia, i missili convenzionali (Patriot, Aster, NASAMS) risultano troppo costosi rispetto alla minaccia che devono neutralizzare e non possono essere prodotti nelle stesse quantità. Il passaggio a missili più piccoli della categoria di Hellfire, Sidewinder e Iris-T risulta più appropriato in quanto riduce il costo dai milioni del Patriot a poche centinaia di migliaia di dollari, ma purtroppo risulta ancora troppo oneroso rispetto alle necessità.
Una possibilità ulteriore è quella di ridurre ancor di più la taglia come nel caso dello AGR-20 Advanced Precision Kill Weapon System (APKWS) che si basa sui piccoli ed economici razzi non guidati Hydra-70 da 70 mm di diametro e circa 2 metri di lunghezza, aggiungendo un kit di guida laser ed alette aerodinamiche mobili di controllo per un costo totale attorno ai 22.000-35.000 dollari per razzo. L'apparato complessivo (lanciatore più sistema di acquisizione e puntamento) può essere montato su di un normale veicolo tipo pick-up (vedi sistema VAMPIRE di L3Harris) o installato su aerei ed elicotteri. Il *range* operativo è di qualche km, esteso a una decina se lanciato da piattaforme aeree veloci. Più di 100.000 esemplari sono

stati prodotti ed impiegati in Ucraina e in Medio Oriente. La piccola taglia e la necessità di guida passiva in linea di vista ne limitano però le capacità in determinati scenari operativi. Questi sistemi di produzione statunitense sono stati recentemente approvati per la vendita all'Italia (5031 kit a 364 milioni di dollari[8]) per utilizzo probabilmente da parte degli Eurofighter dell'Aeronautica (come già fatto dalla Royal Air Force britannica) come misura nei confronti dei droni ostili. L'utilizzo di un caccia da combattimento per trasportare questi razzi ne estende ampiamente il *range* e la flessibilità operative ma può comportare altresì delle limitazioni connesse alla necessità di utilizzo della piattaforma aerea.

Anche molte aziende europee, sia tradizionali (es. MBDA, SAAB, Thales…) che più recenti (Frankenburg Technologies, Skylance GmbH) stanno sviluppando analoghi razzi guidati di taglia molto ridotta per abbattere i costi e aumentare i ratei di produzione ma questi sistemi così piccoli, a volte talmente miniaturizzati da essere pensati per ingaggiare perfino droni quadricotteri al fronte, poi si rivelano limitati nei confronti delle minacce più avanzate e strategiche come i droni della classe di Geran-4 e Geran-5.

Ad ogni modo, con le tecnologie di concezione classica attualmente impiegate è estremamente difficile riuscire a garantire un bilanciamento ottimale tra taglia del missile e sue prestazioni da una parte, e scalabilità industriale, costi e tempi di produzione dall'altra. **Le tecnologie tradizionali a propulsione a razzo solida presentano infatti limiti intrinseci nella riduzione dei costi e nell'aumento dei ritmi produttivi. La produzione di motori a propellente solido è limitata a un numero ristretto di siti autorizzati alla manipolazione di esplosivi. Tale capacità non può essere incrementata rapidamente né decentralizzata, e rappresenta un singolo punto di vulnerabilità critica. La produzione di motori solidi richiede materiali esotici e tolleranze estreme. Per questo motivo emerge la necessità di sviluppare una nuova generazione di missili: sistemi più economici, scalabili e producibili in massa in modo disperso, capaci di ristabilire l'equilibrio tra difesa e offesa.**

In generale il consenso unanime è che in ogni caso la difesa vada strutturata su molteplici livelli di soluzioni diverse e integrate tra loro in modo che la risposta sia ogni volta efficace ed al contempo proporzionale e sostenibile. Questo richiede anche un ripensamento delle dottrine convenzionali, applicando in modo concreto i concetti di difesa a strati (*layered defense*), di mix tra sistemi ad altissime prestazioni ed altri più economici ma in grado di essere prodotti in numeri sostanzialmente superiori, ed infine di (ri)calibrazione dei requisiti sulle necessità economiche, tempistiche e produttive.

LA SOLUZIONE

Come esposto precedentemente, nella situazione attuale le scorte vengono consumate nel giro di giorni e reintegrate nell'arco di anni; la capacità produttiva di missili determina il limite massimo alla durata dell'azione di fuoco di una forza militare. Oggigiorno sono dunque necessarie nuove soluzioni in grado di

[8] Arms Sales Notification – Transmittal No. RSAT 26-92 Department of Defense · Pubblicazione 22 settembre 2026

essere prodotte in grandi numeri, in tempi brevi ed a costi contenuti, utili ad essere impiegate nella difesa di infrastrutture militari e civili sul suolo nazionale.

Tra queste, una delle più promettenti prevede la realizzazione di vettori basati su apparati propulsivi a razzo ibridi, ampiamente testati in T4i negli ultimi 10 anni. Questa tecnologia è progettata per garantire elevata scalabilità industriale, grazie all'impiego prevalente di tecnologie derivate dal settore automotive, che consentono una produzione di massa a costi contenuti.

Il basso costo del sistema e la facilità di produzione e stoccaggio lo rende particolarmente adatto alla protezione di molteplici asset contro minacce numerose ed economiche, come droni e missili. Allo stesso tempo, l'elevata manovrabilità e la capacità di controllo avanzato aumentano significativamente la probabilità di neutralizzazione del bersaglio.

I motori a razzo convenzionali utilizzano un propellente solido esplosivo che può essere prodotto solo da stabilimenti specializzati in località remote e che per la sua pericolosità non può essere stoccato in grandi quantità sul territorio. Sia i siti produttivi che quelli di stoccaggio necessitano quindi di estrema protezione in quanto anche danni minori possono essere amplificati dall'esplosione a catena del propellente solido.

Inoltre, l'attacco riuscito (diretto o tramite sabotaggio) ad uno di questi preziosi siti può mandare completamente a repentaglio per lungo tempo la *supply chain* dei missili intercettori, eliminando una già contingentata fonte di approvvigionamento. Molti incidenti, dolosi o non, sono avvenuti in tempi recenti in tutta Europa, incluso un impianto italiano.

Quello che l'utilizzatore finale percepisce è:

- Un limite minimo di costo unitario che non viene abbattuto dall'aumento dei volumi
- Tempi di realizzazione pluriennali per qualsiasi incremento significativo della capacità produttiva
- Punti critici di vulnerabilità nell'intera catena di approvvigionamento a monte
- Vincoli in termini di stoccaggio, movimentazione, trasporto e dispiegamento avanzato
- Impossibilità di adeguare la produzione ai ritmi imposti da una crisi.

I motori a razzo ibridi invece utilizzano un combustibile solido inerte (plastica) e vengono caricati con protossido d'azoto (gas liquefatto non infiammabile, chimicamente stabile e non tossico, noto come "gas esilarante", trova anche impiego medico come analgesico e anestetico). I propellenti non risultano quindi esplosivi, permettendo ai motori ibridi di poter essere prodotti e stoccati in piena sicurezza in un qualunque capannone sul territorio.

L'assenza di una grossa testata esplosiva e l'utilizzo di un sistema di propulsione inerte garantiscono quindi caratteristiche di "insensitive munition", con importanti vantaggi in termini di sicurezza, semplificazione logistica e riduzione dei costi di produzione, trasporto, stoccaggio e impiego operativo.

La guerra in Ucraina ha dimostrato la debolezza dei grandi impianti di produzione, che possono venire attaccati e distrutti, soprattutto se di tipo civile e non sotterranei e rinforzati. Al contrario la produzione distribuita di oggetti relativamente semplici in tante fabbriche sul territorio ha permesso all'Ucraina di raggiungere altissimi livelli quantitativi (milioni di droni all'anno considerando anche i modelli più piccoli) pur sotto un'incessante campagna di bombardamenti russi.

La propulsione ibrida consente di applicare lo stesso tipo di approccio resiliente alla missilistica, cosa impraticabile con la tradizionale propulsione a solido. La sua natura tecnologica maggiormente dual-use consente a fornitori del settore automobilistico e dell'ingegneria generale di essere rapidamente qualificati e integrati online. La capacità può essere incrementata in parallelo su più siti e più nazioni, adattandosi progressivamente alla domanda. La produzione non è concentrata in un unico stabilimento autorizzato al processamento di energetici che potrebbe essere soggetto a colli di bottiglia, sanzioni o attacchi.

Date le sue caratteristiche, particolarmente rilevanti nel contesto attuale per il settore difesa, la tecnologia a razzo ibrida ha ricevuto pesanti investimenti privati negli Stati Uniti con round di finanziamento da centinaia di milioni di dollari come nel caso delle start-up Firehawk e Vaya.

La tecnologia del sistema completo è concepita per integrarsi pienamente in una rete estesa di rilevamento e ingaggio ("kill web"), basata su una combinazione aperta di satelliti di *early warning*, radar terrestri e aerei e altri sensori distribuiti, assicurando una difesa coordinata, diffusa ed efficace contro le moderne minacce aeree. L'approccio si ispira a quanto avviene oggigiorno in Ucraina, dove l'identificazione e acquisizione avviene contemporaneamente con apparati diversi (e.g. ottici, infrarossi, radar, sonori) distribuiti sul territorio ed integrati in modo sinergico in un'unica rete modulare che permette l'aggiornamento ed integrazione continua di nuove capacità per potersi adattare agilmente all'incessante evoluzione delle minacce avversarie.

I missili sono concepiti per essere racchiusi in contenitori di derivazione civile come container di varia taglia, trasportabili da camion e navi. Questo consente un dispiegamento flessibile, con utilizzo possibile anche a bordo di navi portacontainer, come già sperimentato dai cinesi, garantendo un'enorme potenza di fuoco flessibile, scalabile e reversibile a costi molto contenuti in supporto ad asset avanzati specifici come appunto le FREMM, per esempio nelle missioni di protezione, dato che a causa delle loro necessità multiruolo ed alte prestazioni le navi militari non sono molte ed hanno un *magazine depth* limitato.

Questa tecnologia, grazie alla piena compatibilità con la *supply chain* automobilistica, consente di raggiungere tre obiettivi oggi fondamentali e difficilmente ottenibili con i sistemi missilistici convenzionali: (I) costi di produzione drasticamente ridotti, (II) un'elevata scalabilità industriale, (III) resilienza e flessibilità della *supply chain*.

La tecnologia propulsiva a razzo ibrida è adatta allo sviluppo di una famiglia scalabile e modulare di sistemi di difesa che possono essere prodotti in quantità dalle migliaia fino alle centinaia di migliaia di esemplari per anno a costi dalle migliaia di euro per i sistemi low-end a qualche decina di migliaia di euro per i sistemi high-end. La produzione può inoltre essere modulata secondo le esigenze del momento aumentando i quantitativi nei momenti di crisi e riconvertendo la produzione all'ambito civile nei tempi di ridotta necessità.

Queste caratteristiche permettono di riequilibrare in modo drastico il rapporto tra difesa e attacco, superando l'attuale svantaggio economico e numerico dei sistemi difensivi. Ne deriva la possibilità concreta di realizzare uno scudo difensivo ampio, distribuito e sostenibile, capace di proteggere il

territorio europeo dalle minacce rappresentate da droni di classe Shahed e simili oltre che da altri sistemi aerei e missilistici low-cost prodotti in massa.

Queste soluzioni non intendono sostituire i sistemi ad alte prestazioni sviluppati dall'industria nazionale ed europea, che restano indispensabili, ma affiancarli nei livelli della difesa dedicati alle minacce più numerose ed economiche. Per questo è essenziale che la filiera nazionale si integri e collabori: T4i intende contribuire a questo sforzo comune, mettendo a disposizione le proprie competenze e partecipando insieme agli altri attori del sistema Paese.