

Le nuove frontiere della propulsione aeronautica tra sfide tecnologiche, sostenibilità ambientale e sicurezza nazionale

NICOLÒ MURGIA, ALESSANDRO MARRONE E MICHELE NONES

Il futuro dell'aviazione è sempre più orientato alla sostenibilità e alla decarbonizzazione, spingendo l'innovazione verso soluzioni capaci di ridurre consumi, emissioni e inquinamento acustico. I principali programmi di ricerca e sviluppo si concentrano su nuove architetture motoristiche, propulsioni ibrido-elettriche e turboprop avanzati, nonché sull'uso di combustibili sostenibili come i Saf e l'idrogeno. Parallelamente, nel dominio militare – con forti sinergie con quello civile – emerge la necessità di gestire in modo efficiente l'energia per velivoli sempre più complessi, come quelli di sesta generazione, concepiti come "sistemi di sistemi". In tale contesto, l'evoluzione verso i sistemi di "*power and propulsion*" mira a integrare spinta e generazione elettrica, fornendo energia ai numerosi apparati di bordo. Ciò impone la ricerca di nuovi materiali e tecnologie capaci di ridurre al minimo la segnatura termica, e dunque l'osservabilità. Le sfide che ne derivano – tecnologiche, industriali, finanziarie e di governance – richiedono una collaborazione rafforzata di tutta la catena produttiva della propulsione aeronautica, dalla capofiliera alle Pmi, start-up, centri di ricerca e università, con l'obiettivo di consolidare le capacità nazionali e rendere competitivo e resiliente il sistema europeo nel fronteggiare le sfide della transizione sostenibile.

1 Sfide tecnologiche tra requisiti operativi, alte prestazioni e sostenibilità ambientale

Lo sviluppo di sistemi di propulsione di nuova generazione sia in ambito militare che civile, pur con rilevanti differenze, dovute a specifici requisiti operativi nel primo caso, deve conciliare una crescente domanda in termini di prestazioni e la necessità di concepire soluzioni che vadano sempre più incontro alla sostenibilità ambientale, e dunque alla riduzione delle emissioni. Sotto il profilo prestazionale in ambito militare i nuovi sistemi vengono ormai concepiti come erogatori di propulsione e allo stesso tempo come produttori di energia per tutti i sistemi del velivolo, secondo il concetto di "*power and propulsion*". Questo concetto segue lo sviluppo dei nuovi sistemi aerei

di combattimento, attualmente culminato nel Global Combat Air Programme (Gcap), in cui vi è stato un aumento sistematico di sistemi elettronici da una generazione all'altra¹. Un elevato numero di sistemi, dai sistemi d'arma avanzati al radar, dalla sensoristica alle comunicazioni, implica inevitabilmente un'elevata richiesta energetica e, dunque, una capacità di estrazione di potenza che deve essere garantita dallo stesso motore che genera spinta. Tra i principali fattori che guidano questa traiettoria evolutiva vi è, ad esempio, l'acquisizione di sempre maggiore rilevanza delle interfacce uomo-macchina, che, attraverso sistemi sempre più avanzati, ottimizzano i carichi di lavoro del pilota permettendogli di avere come focus primario la gestione della missione, mentre

¹ Intervista IAI, 28 maggio 2025.

Nicolò Murgia è ricercatore junior nel programma "Difesa, sicurezza e spazio" dell'Istituto Affari Internazionali (IAI). **Alessandro Marrone** è responsabile del Programma "Difesa, sicurezza e spazio" dello IAI. **Michele Nones** è vicepresidente dello IAI.

Questo studio è stato preparato con il supporto di Avio Aero ed è stato anticipato nel seminario che si è tenuto a Roma presso lo IAI il 25 settembre 2025 e poi rivisto alla luce del dibattito svolto.



la gestione del volo è, quanto più possibile, operata dai sistemi di bordo².

Questa traiettoria di sviluppo rappresenta un'attuazione dei requisiti operativi dei velivoli da combattimento di sesta generazione, coerentemente con gli scenari operativi nei quali si prevede l'impiego di queste piattaforme. In particolare, il riferimento è alle capacità necessarie ad affrontare avversari alla pari o quasi, in uno spazio aereo fortemente conteso, a fronte di una proliferazione di sistemi antiaerei, da quelli missilistici a quelli cyber e di guerra elettronica, sempre più sofisticati, e in un contesto operativo sempre più connesso e interconnesso. In quest'ottica, in termini di capacità di produzione di energia, un elemento determinante è ad esempio quello dell'*information superiority*, che si inscrive, ampliandolo, in quello di *air superiority*³. La preminenza dell'*information superiority* si riflette sia sull'incremento della sensoristica, volta all'acquisizione informativa in tempo reale, sia sull'elaborazione dell'informazione attraverso sistemi di intelligenza artificiale e quantistici, anch'essa in tempi molto ridotti e in modo autonomo rispetto al pilota, sia sulla capacità di condivisione delle informazioni con altre piattaforme, anche in altri domini. Quest'ultimo aspetto si inserisce nell'elemento di maggiore innovazione del caccia di sesta generazione, ovvero quello del "sistema di sistemi". Il velivolo rappresenterà infatti una piattaforma principale operante con il supporto di una serie di altri sistemi, prevalentemente senza pilota, denominati *Collaborative Combat Aircraft* (Cca)⁴. Lo sviluppo di un sistema di comunicazione di nuova generazione basato su tecnologia cloud, così come su tecnologie afferenti all'*Internet of Things*, sarà cruciale per garantire la connessione della piattaforma principale con i Cca senza che questo gravi sul carico di lavoro del pilota. Il motore di nuova generazione fungerà dunque da *enabler* per tutti i sistemi di *information superiority* e di avionica integrata, che necessiteranno di una

² Marrone, Alessandro, a cura di, "The New Partnership among Italy, Japan and the UK on the Global Combat Air Programme (GCAP)", in *Documenti IAI*, n. 25|03 (marzo 2025), <https://www.iai.it/it/node/19737>.

³ Intervista IAI, 9 giugno 2025.

⁴ Bovalino, Yari e Alberto Fronticelli, "The System of Systems", in *Avio Aero Articles*, 19 maggio 2022, <https://www.avioaero.com/news/articles/the-system-of-systems>.

generazione, gestione e distribuzione dell'energia particolarmente complesse e diverse dai meccanismi operanti nelle piattaforme *legacy*⁵. Relativamente ai sistemi propulsivi dei Cca è necessario notare che questo segmento è molto diversificato e include velivoli di varie dimensioni e concepiti per diverse tipologie d'impiego. Le piattaforme di dimensioni ridotte, ad esempio, sacrificabili e progettate per missioni specifiche, richiedono sistemi propulsivi caratterizzati da semplicità e convenienza economica, in netto contrasto con le esigenze delle piattaforme principali, che devono garantire un alto livello di *survivability*. Per tale ragione, risulta di fondamentale importanza selezionare e adattare solo le tecnologie essenziali, segnando un cambio di paradigma rispetto allo sviluppo di quei sistemi destinati a durare nel tempo, altamente affidabili e capaci di garantire elevate prestazioni nelle operazioni. Tra questi due estremi si collocano soluzioni intermedie, con requisiti propulsivi che bilanciano tecnologia avanzata e costi contenuti.

Una delle principali sfide che emergono dallo sviluppo di un motore in grado di soddisfare i suddetti requisiti in un'ottica *power and propulsion* è quella relativa alla gestione della segnatura termica. A una maggiore produzione di energia, infatti, corrisponde inevitabilmente una maggiore emissione di calore, con un impatto negativo sull'osservabilità del velivolo sia nelle frequenze dell'infrarosso sia in quelle radar⁶. Se, infatti, la gestione termica rappresenta una delle principali innovazioni della quinta generazione di sistemi aerei da combattimento, come esemplificato dalle significative capacità *stealth* del F-35, per la sesta generazione questa caratteristica dovrà essere ancora più avanzata, in virtù delle prestazioni richieste. Assumono quindi particolare rilevanza soluzioni volte a contenere la segnatura termica generata dagli elevati livelli di produzione energetica del sistema di propulsione, con un'attenzione specifica a materiali innovativi a bassa emissività, architetture in grado di massimizzare la dissipazione del calore tramite

⁵ Intervista IAI, 27 maggio 2025.

⁶ van Heerden, Albert S.J. et al., "Aircraft Thermal Management: Practices, Technology, System Architectures, Future Challenges, and Opportunities", in *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 128 (2022), art. 100767, <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2021.100767>.



flussi d'aria in entrata e in uscita, nonché sistemi di gestione attiva del calore⁷.

Questa molteplicità di elementi esemplifica come la produzione e la gestione di energia saranno tra gli aspetti principali per i motori di nuova generazione. L'adozione di un motore con caratteristiche avanzate comporta conseguenze significative sull'intero sistema aeronautico. In particolare, richiede una revisione della configurazione interna del propulsore e del velivolo, incidendo sulla gestione dei carichi, sull'interfaccia elettronica e sulla progettazione delle fonti energetiche. Per affrontare queste sfide, è necessario un approccio che combini in modo sinergico competenze in ambito meccanico, elettrico e termodinamico, con il supporto di strumenti di simulazione multi-fisica capaci di prevedere e ottimizzare le prestazioni complessive⁸. Parallelamente, diventa imprescindibile riprogettare l'architettura propulsiva, puntando su soluzioni in grado di migliorare la produzione, la distribuzione e la conversione dell'energia, anche attraverso l'integrazione di componenti elettrici ad alta potenza specifica e sistemi di controllo evoluti⁹. Infine, l'interdipendenza crescente tra propulsione e gestione energetica impone una cooperazione ancora più stretta tra motoristi, equipaggiatori e velivolisti, affinché l'integrazione tra sottosistemi risulti efficiente e coerente con l'intero progetto del velivolo¹⁰.

Nella propulsione aeronautica lo sviluppo di sistemi civili e sistemi militari è caratterizzato da una forte sinergia, come dimostrato dal ruolo svolto da Avio Aero in entrambi i settori, avvalendosi dei molti aspetti *dual use*. Da questo punto di vista, la crescente elettrificazione dei sistemi, e dunque la necessità di una maggiore produzione energetica per alimentarli, è una caratteristica comune alle prospettive di sviluppo propulsivo sia civile che militare. In entrambi i casi, ma con obiettivi e declinazioni diverse, questo processo è funzionale al raggiungimento di un maggior livello di prestazioni. Come si è già visto, in campo militare, il concetto di *power and propulsion* è funzionale a garantire che il velivolo possa impiegare ottimamente tutti i sistemi di

bordo, oltre che operare in un'ottica di sistema di sistemi. In ambito civile, invece, l'ottimizzazione delle prestazioni viene declinata in un'ottica di efficienza e sostenibilità, economica e ambientale. Risulta evidente come in questo caso al velivolo non siano richieste manovrabilità, segnatura termica e profili di missione particolarmente avanzati, ma la capacità di percorrere distanze quanto maggiori possibili con un consumo di carburante quanto più ridotto possibile¹¹. La riduzione delle emissioni e dei pesi, in linea con la riduzione dei consumi e quindi dei costi operativi, rappresenta un incentivo in un'ottica di profittevolezza. Questo rende il perseguitamento della sostenibilità ambientale coerente con quello della sostenibilità economica. In ambito militare, invece, la sostenibilità ambientale è inevitabilmente sottoposta al rispetto dei requisiti operativi e al raggiungimento delle alte prestazioni necessarie per operare negli scenari che rappresentano le prospettive di impiego di piattaforme come i velivoli da combattimento di nuova generazione. In ultimo, bisogna considerare che l'aviazione civile, essendo espressione di un settore commerciale, è soggetta alle pressioni dei consumatori, che riflettono le proprie sensibilità sulla domanda del servizio di trasporto aereo, tra le quali hanno assunto rilevanza anche quelle di carattere ambientale.

2 Prospettive di sviluppo di nuovi sistemi di propulsione per l'aviazione civile e di impiego di carburanti alternativi

2.1 Sostenibilità e nuove architetture motore

Il programma Rise (Revolutionary Innovation for Sustainable Engines), lanciato nel 2021 da Cfm, joint venture tra GE Aerospace e Safran Aircraft Engines, rappresenta un esempio significativo delle traiettorie di sviluppo dell'industria in un'ottica di decarbonizzazione. Il programma si pone infatti l'obiettivo di sviluppare numerose tecnologie innovative per l'aviazione del futuro, tra cui un'architettura motore *open fan* per incrementare l'efficienza propulsiva, che sia in grado di ridurre

⁷ Intervista IAI, 12 giugno 2025.

⁸ Intervista IAI, 9 giugno 2025.

⁹ Intervista IAI, 27 maggio 2025.

¹⁰ Intervista IAI, 12 giugno 2025.

¹¹ Intervista IAI, 13 giugno 2025.



del 20 per cento i consumi di carburante rispetto all'attuale generazione di motori in servizio, che sia compatibile con i Saf (*Sustainable Aviation Fuels*) e con la possibilità di integrare tecnologie propulsive ibride o a idrogeno¹². Al fine di testare l'integrazione del motore *open fan* su un velivolo, è stato inizialmente programmato un test su un Airbus, con l'ulteriore obiettivo di valutare le opzioni di propulsione per il successore dell'A320, aereo a corto-medio raggio a corridoio singolo¹³.

Uno degli aspetti che rilevano maggiormente del programma Rise è l'architettura *open fan*, rappresentata da una ventola che, non essendo contenuta nella *nacelle*, è di dimensioni maggiori rispetto alle ventole dei motori attualmente in uso sui velivoli per trasporto passeggeri. A differenza delle architetture contro-rotanti del passato, Rise prevede una configurazione *single-rotor*, con una fila di pale mobili davanti mentre quelle posteriori sono fisse, ma con *pitch* variabile, il che permette di gestire al meglio il flusso di spinta generato dalle pale rotanti¹⁴. Il motore *open fan* permetterebbe di fare un salto generazionale in termini di efficienza propulsiva, superando i limiti strutturali imposti dall'utilizzo della *nacelle*. Questo salto è esemplificato dall'incremento del rapporto di *bypass*, che indica la porzione di aria che attraversa il motore e viene bruciata con il combustibile rispetto a quella che lo "bypassa", e che, con l'architettura *open fan*, arriverebbe ad essere di 60:1, mentre nei motori attualmente in uso è di 11:1¹⁵. L'architettura *open fan* favorisce potenzialmente il profilo aerodinamico del velivolo, ma è necessario valutare con attenzione l'impatto sulle interazioni tra motore e ala e il

conseguente adattamento di dispositivi ad alta portanza come *flaps* e *slats*¹⁶. Uno dei principali ostacoli allo sviluppo e all'utilizzo di questo motore è stato finora rappresentato dalla gestione delle emissioni acustiche. La *nacelle* è infatti responsabile di un significativo assorbimento di queste. Secondo i progressi del programma Rise, tuttavia, il motore di nuova generazione, a velocità Mach 0.8, quella degli attuali velivoli a corridoio singolo, dovrebbe essere in grado di rispettare le normative sulla firma acustica¹⁷. A questo scopo sono in fase di studio materiali compositi e geometrie ottimizzate, anche al fine di garantire un elevato livello di resistenza delle pale. In caso di rottura di una di queste, infatti, non vi sarebbe la *nacelle* a contenere eventuali detriti, con il rischio che questi possano penetrare all'interno della fusoliera¹⁸.

2.2 Ibrido elettrico

Il motore ibrido, cioè la combinazione di motore a combustione e motore elettrico, è considerato una delle principali soluzioni per gli sforzi di riduzione dei consumi e delle emissioni, incluse quelle acustiche, senza compromettere efficienza e prestazioni. Nonostante lo sviluppo di sistemi di propulsione ibridi sia ancora in fase sperimentale, l'elevato numero di progetti conferma la crescente aspettativa.

Un contributo significativo nello sviluppo di motori ibridi in Europa proviene da Avio Aero attraverso la partecipazione a diversi progetti come Imothep (*Investigation and Maturation of Technologies for Hybrid Electric Propulsion*), volto a valutare il potenziale effettivo della propulsione ibrido-elettrica per l'aviazione civile, e Iron (*Innovative Turboprop Configuration*), che include lo studio di una configurazione con sistema di propulsione ibrida diffusa con particolare riferimento a motori turboprop *open fan*¹⁹.

¹² Delling, Dianna, "5 Things to Know About the CFM RISE Program", in *GE Aerospace Articles*, 18 dicembre 2024, <https://www.geaerospace.com/news/articles/5-things-know-about-cfm-rise-program>.

¹³ Pfeifer, Sylvia, "Airbus to Test Radical Engine Design for Successor to A320", in *Financial Times*, 25 marzo 2025, <https://www.ft.com/content/bf9a3ac7-0928-44ba-a394-27e546203ea0>.

¹⁴ Airbus, "Could an Open Fan Engine Cut Carbon Emissions for More Sustainable Aviation?", in *Airbus Web Stories*, 19 luglio 2022, <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2022-07-could-an-open-fan-engine-cut-carbon-emissions-for-more-sustainable>.

¹⁵ Morris, Caroline, "The Shape of Things to Come: Open Fan Technology Championed at Airbus Summit 2025", in *GE Aerospace Articles*, 3 aprile 2025, <https://www.geaerospace.com/news/articles/shape-things-come-open-fan-technology-championed-airbus-summit-2025>.

¹⁶ Airbus, "Testing the Open Fan's Promise", in *Airbus Web Stories*, 20 maggio 2025, <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2025-05-testing-the-open-fans-promise>.

¹⁷ Sito Cfm Rise: *Engine Architecture*, <https://www.cfmaeroengines.com/rise/engine-architecture>.

¹⁸ Schuurman, Richard, "CFM RISE Is No Longer Just a Paper Concept Engine", in *AirInsight*, 17 giugno 2023, <https://airinsight.com/cfm-rise-is-no-longer-just-a-paper-concept-engine>.

¹⁹ Sito Avio Aero: *New Technologies*, <https://www.avioaero.com/aviation-innovation/new-technologies>.



Avio Aero è, inoltre, coordinatore del progetto Amber, finanziato con circa 34 milioni di euro dal programma Clean Aviation Joint Undertaking della Commissione europea. Il progetto, avviato nel 2022, prevede lo sviluppo di un dimostratore tecnologico di un'architettura motore ibrido-elettrica alimentata da cellule a combustibile a idrogeno da 1 megawatt. Le componenti ibrido-elettriche verranno integrate con celle a combustibile e con il motore turboprop Catalyst²⁰. L'obiettivo è il dimezzamento del consumo di carburante e delle emissioni rispetto ai valori del 2020 relativi ai velivoli regionali d'avanguardia²¹.

I vantaggi che si prospettano dall'impiego e dalla diffusione dei motori ibridi attengono primariamente alla riduzione dei consumi e delle emissioni, nonché a una più efficiente gestione della firma acustica e termica. Un minore livello di consumi implica costi operativi più bassi e dunque, maggiore sostenibilità a livello economico. A questo si accompagna conseguentemente una maggiore sostenibilità ambientale derivante da un contenimento delle emissioni, specialmente di anidride carbonica (CO_2) e ossidi di azoto (NO_x). Il motore ibrido garantisce anche maggiore silenziosità, quindi un minore livello di inquinamento acustico. La spinta generata dal motore elettrico potrebbe venire impiegata in fase di decollo e atterraggio, i momenti in cui la generazione di rumore è maggiormente problematica data la prossimità ai centri abitati rispetto alla fase di crociera²². Inoltre, la complessiva riduzione delle emissioni acustiche derivante dall'adozione del motore ibrido andrebbe a beneficio dei passeggeri, con un incremento del comfort, aspetto particolarmente rilevante per le compagnie aeree in ottica commerciale. Sotto il profilo militare, invece, una riduzione delle emissioni di calore porta benefici significativi in termini di bassa osservabilità. A questo si aggiunge la flessibilità logistica derivante dalla diversificazione delle fonti di approvvigionamento grazie all'alimentazione

²⁰ Avio Aero, *Avio Aero Launches Hybrid Electric Technology Demonstration Program in Europe*, 15 dicembre 2022, <https://www.aviaoero.com/news/press-releases/avio-aero-launches-hybrid-electric-technology-demonstration-program-europe>.

²¹ Sito Cordis: *InnovAtive DeMonstrator for hyBrid-Electric Regional Application*, <https://doi.org/10.3030/101102020>.

²² Intervista IAI, 1 luglio 2025.

ibrida, nonché la resilienza energetica garantita dalla possibilità di ricorrere al motore elettrico, sia per la propulsione che per l'alimentazione dei sistemi elettronici in caso di guasto del motore termico e viceversa. Quest'ultimo aspetto è previsto dal regolamento CAT.OP.MPA.181(c) (6), che prescrive un'autonomia che permetta al velivolo di raggiungere un aeroporto alternativo in caso di danneggiamento o di esaurimento delle riserve di energia o carburante²³.

L'alimentazione ibrida, tuttavia, presenta anche una serie di sfide, a partire dal raggiungimento di una maggiore densità energetica e dallo sviluppo di sistemi di immagazzinamento dell'energia sicuri, efficienti e che non compromettano i requisiti in termini di peso, bilanciamento e ingombro²⁴. Le attuali batterie infatti non raggiungono la densità energetica del carburante convenzionale e vi è dunque il rischio che i vantaggi derivanti dalla maggior efficienza energetica dell'ibrido vengano compromessi da pesi troppo elevati delle batterie. In quest'ottica, è necessario garantire una fusione armonica tra il motore a combustione e quello elettrico, attraverso la progettazione multi-fisica avanzata, algoritmi di controllo e un'architettura modulare che possa rispondere ai requisiti delle diverse fasi del volo²⁵. Oltre alla propulsione del velivolo e all'alimentazione dei sistemi elettronici di bordo, vi è poi l'aspetto dell'infrastruttura che deve garantire l'approvvigionamento di energia, dai sistemi di ricarica ad alta tensione ai magazzini di batterie. Significativi investimenti per lo sviluppo di tale infrastruttura sono una prerogativa per una diffusione su larga scala del motore ibrido. In ambito militare è probabile che questo possa essere adottato primariamente come soluzione per piattaforme senza equipaggio e per velivoli da trasporto, i cui profili di missione non presentano significative differenze rispetto ai velivoli commerciali. Per un'eventuale implementazione su velivoli da combattimento con equipaggio, l'orizzonte temporale sarà considerevolmente più lungo.

²³ European Union Aviation Safety Agency (Easa), *Easy Access Rules for Air Operations (Regulation (EU) No 965/2012)*, 14 febbraio 2025, <https://www.easa.europa.eu/en/node/20344>.

²⁴ Intervista IAI, 9 giugno 2025.

²⁵ Ibid.



2.3 Idrogeno

L'idrogeno rappresenta un'alternativa particolarmente rilevante in un'ottica di decarbonizzazione, essendo caratterizzato, a fronte di una radicale riduzione delle emissioni, da una densità energetica superiore a quella dei combustibili tradizionali. Questa è, ad esempio, tre volte superiore nell'idrogeno rispetto a quella del cherosene²⁶. Tuttavia, essendo caratterizzato da una bassa densità volumetrica, il suo impiego richiede l'utilizzo di serbatoi molto ampi, con una necessità di volumi necessari che possono arrivare ad essere quattro volte quelli del cherosene²⁷.

L'impiego di sistemi di propulsione alimentati a idrogeno permette di abbattere completamente le emissioni di CO₂ e di ridurre drasticamente quelle di NO_x fino al 50-80 per cento in caso di combustione diretta con l'utilizzo della turbina, e oltre il 90 per cento nel caso di utilizzo di *fuel cell* a idrogeno, dove l'utilizzo di un motore elettrico sostituisce la combustione²⁸. Anche nel caso dell'idrogeno, un ampio livello di diffusione, e dunque, una crescita dell'offerta sono aspetti chiave nell'abbassamento dei costi di questa fonte di energia ed è pertanto dirimente per definire la sostenibilità economica del suo utilizzo nel lungo periodo. Un ulteriore punto di forza è rappresentato dalle ridotte emissioni acustiche derivanti dall'utilizzo delle *fuel cell*, con un conseguente incremento del comfort dei passeggeri in ambito civile²⁹. Infine, l'elevata efficienza energetica delle *fuel cell* rende, sul piano teorico, l'alimentazione a idrogeno particolarmente idonea a fornire l'energia necessaria al funzionamento di tutti i sistemi del velivolo, dalla sensoristica alle comunicazioni.

L'idrogeno, tuttavia, presenta una serie di sfide e complessità particolarmente rilevanti. Infatti,

pur consentendo in prospettiva un abbattimento delle emissioni più radicale, non consente la linearità logistica e tecnica rispetto ai carburanti convenzionali che permette, ad esempio, l'utilizzo dei Saf. L'impiego dell'idrogeno richiederebbe infatti lo sviluppo di appositi sistemi propulsivi e serbatoi, nonché una completa ridefinizione dell'impianto logistico a terra e sfide significative per quanto riguarda la sicurezza³⁰. In particolare, la necessità di sistemi di stoccaggio criogenico e l'impiego di materiali molto resistenti per evitare l'*embrittlement*, ossia una compromissione della duttilità e della resistenza dei metalli derivante dal contatto con l'idrogeno, richiedono una completa ridefinizione della catena logistica, con un elevato impatto a livello organizzativo e di costo³¹. Analogamente, il volume e il peso dei serbatoi criogenici da installare sul velivolo richiedono design appositi e rischiano di penalizzare il profilo aerodinamico per via delle modifiche strutturali necessarie³².

L'adozione dell'idrogeno richiederebbe dunque una ridefinizione non solo degli aspetti tecnici relativi al suo impiego sui sistemi aerei, ma un ripensamento dell'intero processo che rende questi ultimi operativi, dal trasporto del carburante al rifornimento e alla manutenzione. L'idrogeno si prospetta dunque come una soluzione alla sfida della decarbonizzazione in campo aeronautico con un orizzonte temporale di medio-lungo termine. Questa prospettiva si applica sia al campo civile che a quello militare, per quanto nell'ultimo caso le prospettive di un impiego rimangano ancora più incerte, anche in considerazione di processi di certificazione particolarmente lunghi e della necessità di investimenti significativi³³.

È, tuttavia, necessario comprendere che in ambito civile non tutti i combustibili alternativi possono essere una soluzione adatta a qualsiasi segmento di mercato. Ad esempio, l'idrogeno può

²⁶ Hoff, Tim et al., "Implementation of Fuel Cells in Aviation from a Maintenance, Repair and Overhaul Perspective", in *Aerospace*, vol. 10, n. 1 (2023), art. 23, <https://doi.org/10.3390/aerospace10010023>.

²⁷ Ibid.

²⁸ Ciupek, Bartosz et al., "Research on Carbon Footprint Reduction During Hydrogen Co-Combustion in a Turbojet Engine", in *Energies*, vol. 17, n. 21 (2024), art. 5397, <https://doi.org/10.3390/en17215397>.

²⁹ Renouard-Vallet, Gwénaëlle et al., "Improving the Environmental Impact of Civil Aircraft by Fuel Cell Technology: Concepts and Technological Progress", in *Energy & Environmental Science*, vol. 3, n. 10 (2010), p. 1458-1468, <https://doi.org/10.1039/B925930A>.

³⁰ Intervista IAI, 1 luglio 2025.

³¹ Campari, Alessandro et al., "A Review on Hydrogen Embrittlement and Risk-Based Inspection of Hydrogen Technologies", in *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 48, n. 90 (2023), p. 35316-35346, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.293>.

³² Janovec, Michal et al., "Performance and Weight Parameters Calculation for Hydrogen- and Battery-Powered Aircraft Concepts", in *Aerospace*, vol. 10, n. 5 (2023), art. 482, <https://doi.org/10.3390/aerospace10050482>.

³³ Intervista IAI, 9 giugno 2025.



rappresentare una soluzione per velivoli *narrow body* come il 737 prodotto dalla Boeing o l'A320 di Airbus, ma non per i vettori *wide body* a lungo raggio, per i quali i Saf rimangono tra le principali soluzioni in un'ottica di decarbonizzazione³⁴. Una delle principali motivazioni per questa distinzione è legata alle grandi dimensioni che i serbatoi di idrogeno dovrebbero assumere sui velivoli destinati ai voli intercontinentali per garantire l'autonomia necessaria. Dimensioni che renderebbero molto complessa un'integrazione efficiente nell'architettura complessiva dell'aereo senza inficiarne i profili di aerodinamicità. È necessario tenere conto di questo aspetto soprattutto in ragione del fatto che i voli *long haul*, termine con cui si fa riferimento alle tratte superiori ai 4.000 chilometri, corrispondenti tendenzialmente al traffico intercontinentale, rappresentano circa il 10-15 per cento (il 6 per cento in Europa) dei voli complessivi e sono responsabili per il 40-50 per cento delle emissioni³⁵.

2.4 Sustainable Aviation Fuels (Saf)

I Saf si profilano attualmente come una delle principali alternative ai combustibili standard in ottica di decarbonizzazione in considerazione di un'emissione di CO₂ fino al 80 per cento inferiore rispetto a questi³⁶. I Saf esistono in diverse tipologie e vengono prodotti a partire da una molteplicità di fonti dette *feedstock*. Gli Hefa (*hydroprocessed esters and fatty acids*), la tipologia con il maggior livello di maturità e la maggiore quota di mercato, hanno come *feedstock* oli vegetali, grassi animali, oli usati da cucina, e sono prodotti tramite processi di idrogenazione e *hydrocracking* in impianti già esistenti³⁷. Possono inoltre essere usati in blend con carburante convenzionale fino al 50 per cento. Non essendovi un processo di estrazione della materia prima di base che danneggia l'ecosistema né compete con le colture alimentari o le fonti idriche, questa tipologia

di carburante è particolarmente sostenibile. A differenza dei combustibili fossili, che aumentano la quantità totale di CO₂ nell'atmosfera rilasciando il carbonio precedentemente immagazzinato, il Saf ricicla la CO₂ assorbita dalla biomassa utilizzata come materia prima nel corso della sua vita³⁸. Allo stato attuale sono stati certificati nove processi di produzione di Saf, concepiti per essere *drop-in by design* e allo stesso livello operativo del carburante Jet A1³⁹. La specifica *drop-in* garantisce di non dover apportare modifiche alle attuali infrastrutture del carburante negli aeroporti e piena compatibilità con i velivoli attuali, senza necessità di alterare l'architettura del motore.

L'impiego dei Saf è attualmente in fase di sperimentazione da parte dell'Aeronautica Militare italiana, che punta ad ampliarne l'uso sulla sua flotta, come dimostrato dai test sul M346 che verranno effettuati a breve per dimostrare la capacità di gestire una miscela di carburante standard-Saf al 50 per cento⁴⁰. Il limite del 50 per cento è attualmente previsto dallo standard Astm D7566, benché vi siano revisioni con cadenza annuale⁴¹.

Uno dei principali vantaggi dell'impiego dei Saf è quello della modalità *drop-in*, che porta implicazioni di carattere operativo, logistico ed economico. Il *drop-in* permette infatti di impiegare carburanti standard e sostenibili in modo intercambiabile e combinato. L'allentamento dei vincoli relativi alle miscele utilizzabili alleggerirebbe la complessità logistica, dato che renderebbe possibile optare, in modo intercambiabile, per la tipologia di carburante più facilmente reperibile con riferimento alla collocazione del teatro operativo. Questo è particolarmente rilevante soprattutto se si considera che i carburanti sostenibili stanno diventando sempre più disponibili per via della spinta all'adozione di questi con l'introduzione di nuove regolamentazioni come il regolamento UE 2023/2405 (ReFuelEU Aviation), il che si

³⁴ Intervista IAI, 12 giugno 2025.

³⁵ Eurocontrol, "Eurocontrol Data Snapshot #4 on CO₂ Emissions by Flight Distance", in *Eurocontrol Data Snapshots*, 16 febbraio 2021, <https://www.eurocontrol.int/node/12685>.

³⁶ Sito Airbus: *What Is Sustainable Aviation Fuel?*, <https://www.airbus.com/en/innovation/energy-transition/our-commitment-to-saf/sustainable-aviation-fuels>.

³⁷ Sito Easa: *What are Sustainable Aviation Fuels?*, <https://www.easa.europa.eu/en/node/140876>.

³⁸ CarbonClick, *How Does SAF Reduce Emissions? Exploring Its Benefits*, 1 gennaio 2023, <https://www.carbonclick.com/news-views/how-does-saf-reduce-emissions-exploring-its-benefits>.

³⁹ Sia, *The Essentials of Sustainable Aviation Fuel*, 22 agosto 2024, <https://www.sia-partners.com/en/node/16948>.

⁴⁰ Intervista IAI, 27 maggio 2025.

⁴¹ Intervista IAI, 27 maggio 2025; ASTM D7566: *Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons*, <https://store.astm.org/d7566-24d.html>.



riflette sugli obblighi di disponibilità di carburanti sostenibili presso gli aeroporti civili⁴². L'impiego di Saf in ambito militare rappresenta, quindi, anche l'adeguamento alla diffusione di questi carburanti, con la conseguente progressiva diversificazione delle fonti di energia impiegabili. Vi sarebbero, di conseguenza, significative implicazioni sia a livello di flessibilità operativa che di sicurezza energetica. Inoltre, il non dover alterare la struttura della filiera per produrre motori appositamente per l'utilizzo di Saf permette di avere benefici di diversificazione per quanto concerne il carburante senza avere conseguentemente bisogno di produrre e manutenere motori con caratteristiche diverse, con una duplicazione delle linee di lavoro e un conseguente aumento dei costi.

Un altro aspetto da tenere in considerazione è l'impatto sulla disponibilità di carburante per usi militari della transizione verso l'alimentazione elettrica nel settore civile. Un impiego decrescente dei combustibili fossili, al momento concentrato particolarmente nel settore *automotive* e, conseguentemente, un calo della domanda potrebbero portare a una maggiore complessità nell'approvvigionamento, soprattutto laddove quest'ultimo dipende da infrastrutture civili⁴³. In quest'ottica, investire in carburanti alternativi permette di diversificare, a patto però che vi sia un conseguente rafforzamento delle capacità di approvvigionamento e stoccaggio che assicuri un adeguato grado di autonomia per le forze armate.

Nonostante in ambito civile i carburanti alternativi siano stati introdotti per ragioni di sostenibilità ambientale, con l'obiettivo di ridurre le emissioni di CO₂, in ambito militare una piena introduzione non può prescindere dal mantenimento dei requisiti prestazionali e di sicurezza richiesti. Questo implica che una piena adozione dei Saf richieda un completo soddisfacimento dei processi di verifica e certificazione relativi all'impatto dei Saf sulle discipline di *reliability*, *Maintainability* e *testability*. Vi sono tuttavia ulteriori sfide, come la scalabilità dell'impiego di questi carburanti e la solidità della catena di approvvigionamento. Il primo

fa riferimento alla necessità di una crescita significativa nell'adozione dei Saf perché questa possa divenire vantaggiosa a livello economico, nonché efficiente a livello operativo e logistico. Allo stato attuale, infatti, i Saf rappresentano ancora un'alternativa con un costo maggiore rispetto al carburante standard e con una maggiore complessità di approvvigionamento, due aspetti legati alla disponibilità ancora ridotta di questa soluzione⁴⁴. Si prospetta, quindi, come essenziale un investimento che possa portare i Saf ad essere un'alternativa non solo credibile, ma anche diffusa e conveniente. Qualora, tuttavia, i Saf dovessero essere considerati semplicemente come un elemento di transizione verso soluzioni come il motore ibrido e l'alimentazione a idrogeno, sarebbe complesso giustificare l'opportunità di tali investimenti e arrivare a una loro piena maturità e diffusione.

Il secondo aspetto di sfida, invece, è relativo alla sicurezza e alla resilienza della catena di approvvigionamento rispetto al rischio di interruzioni dovute a shock esterni. In quest'ottica la valutazione di Saf che possano essere prodotti a partire da materia prima facilmente accessibile a livello nazionale o europeo rappresenterebbe un vantaggio, rafforzando la resilienza della catena di approvvigionamento e limitando le dipendenze esterne. In Italia, ad esempio, non vi è sufficiente disponibilità di terreni per colture di prodotti vegetali non edibili, che rappresentano una delle potenziali materie prime da cui produrre Saf⁴⁵. Invece, la categoria degli *electrofuel*, prodotta a partire da una combinazione di idrogeno e CO₂, che riflette i profili del carburante standard, rappresenterebbe una possibile opzione.

3 Sfide e opportunità della filiera della propulsione aeronautica

La filiera produttiva della propulsione aeronautica si contraddistingue per un'estensione pressoché globale e la presenza di grandi player, prevalentemente americani come General Electric Aerospace e Pratt & Whitney, ma non solo, come ad esempio Rolls Royce in Gran

⁴² Ente Nazionale per l'Aviazione Civile (Enac), *Verso una roadmap per i Sustainable Aviation Fuels in Italia: sintesi del percorso dell'Enac per la definizione di SAF policy*, 20 ottobre 2023, <https://www.enac.gov.it/?p=45754>.

⁴³ Intervista IAI, 27 maggio 2025.

⁴⁴ Intervista IAI, 9 giugno 2025.

⁴⁵ Ibid.



Bretagna e Safran in Francia⁴⁶. Una filiera globalizzata, se da un lato garantisce un'elevata efficienza sul piano economico, nella ripartizione e nell'organizzazione dei processi produttivi, dall'altra, come dimostrato da eventi recenti, quali l'imposizione di dazi dell'amministrazione Trump o la crisi del trasporto marittimo nel Mar Rosso causata dagli attacchi degli Houti, è sempre più esposta a rischi e vulnerabilità, proprio in funzione della sua lunghezza. Un primo aspetto da considerare è quello delle competenze, che nell'ambito della propulsione aeronautica sono particolarmente complesse, con tempistiche di sviluppo e maturazione significativamente lunghe. In quest'ottica, ad esempio, il licenziamento di circa il 21 per cento della forza lavoro impiegata nella filiera statunitense come conseguenza del calo della domanda innescata dall'epidemia di Covid-19 ha portato alla perdita di competenze che non è possibile ricostituire in breve tempo⁴⁷. La contrazione dei livelli produttivi e occupazionali negli Stati Uniti come risultante dalla pandemia, ad esempio, ha avuto un impatto significativo sulla disponibilità di fusioni e forgiati di produzione statunitense⁴⁸. Una marcata concentrazione geografica implica una maggiore vulnerabilità a shock esterni, intesa come difficoltà nell'assorbirli nel breve termine e nell'implementare gli aggiustamenti necessari a porre rimedio alle conseguenze nel medio-lungo termine. Un mancato pieno recupero, come nel caso sopraccitato delle competenze, può tradursi in una minore qualità e in una maggiore incidenza di casi di difettosità, con gravi conseguenze per l'intera catena produttiva⁴⁹.

Un'estesa filiera globale è inevitabilmente esposta al crescente rischio geopolitico. Questo può manifestarsi sotto forma di conflitti, che possono impedire o complicare il traffico di merci in una determinata area e intaccare l'operabilità di alcuni attori della filiera in quell'area, così come

⁴⁶ Intervista IAI, 11 giugno 2025.

⁴⁷ Fearn, Nicholas, "Aerospace Industry Grounded by Lost Jobs and Lack of Staff", in *Financial Times*, 20 luglio 2022, <https://www.ft.com/content/93736968-8fcf-425f-b8e5-fcd9736d37f6>.

⁴⁸ Pietro Batacchi, "Intervista all'AD di Avio Aero, Riccardo Procacci", in *Portale Difesa*, 26 maggio 2023, <https://www.rid.it/shownews/5778/intervista-all-rsquo-ad-di-avio-aero-riccardo-procacci>.

⁴⁹ Intervista IAI, 12 giugno 2025.

di scelte politiche quali l'imposizione di dazi e altre forme di restrizione alla libera circolazione delle merci. Il significativo incremento di questo rischio, che si accompagna e si cumula con altre tipologie di rischio, come quello climatico, rappresentato da fenomeni atmosferici sempre più violenti e imprevedibili, aumenta la possibilità che si generino rallentamenti o interruzioni nella filiera⁵⁰. Essendo poi la filiera della propulsione aeronautica caratterizzata da una diffusa presenza di monopoli e oligopoly, per via di un'elevata concentrazione di capacità e competenze in un numero ristretto di attori, l'impatto di una crisi su uno di questi si propagherebbe inevitabilmente al resto della filiera.

La vulnerabilità della catena di approvvigionamento non è limitata, tuttavia, alla concentrazione di capacità, dal momento che anche la reperibilità di materie prime rappresenta un elemento critico, essendo queste il primo tassello dell'intero processo produttivo. Oltre ai rallentamenti e ai colli di bottiglia risultanti o acuiti dal Covid-19 vi sono complessità crescenti legate alle crisi geopolitiche sopra menzionate. La fornitura di titanio metallico, ad esempio, che in Europa viene assorbita per due terzi dall'industria aerospaziale, è fortemente dipendente dalla Russia. L'invasione russa dell'Ucraina e le relative ripercussioni nei rapporti commerciali tra Russia e Unione europea hanno reso particolarmente vulnerabile questa fornitura chiave, la cui rilevanza è stata evidenziata dalla scelta dei Paesi europei di escludere il titanio dai metalli le cui importazioni dalla Russia sono state sanzionate⁵¹.

A fronte, dunque, di queste vulnerabilità si rendono essenziali, soprattutto per il capo filiera, attività di *derisking* volte a mitigare l'impatto di possibili shock. Prima fra tutte vi è la necessità di differenziare il portfolio dei fornitori, per arginare colli di bottiglia e monopoli e aumentare dunque la resilienza della filiera. Questa operazione non è a sua volta priva di criticità, in considerazione

⁵⁰ Berckman, Lindsey et al., "2025 Aerospace and Defense Industry Outlook", in *Deloitte Center for Energy and Industrials Insights*, 23 ottobre 2024, <https://www.deloitte.com/us/en/insights/industry/aerospace-defense/aerospace-and-defense-industry-outlook.html>.

⁵¹ Home, Andy, "Europe Struggles to Break Russia's Titanium Grip", in *Reuters*, 24 settembre 2024, <https://www.reuters.com/markets/commodities/europe-struggles-break-russias-titanium-grip-andy-home-2024-09-24>.



dell'incertezza legata all'introduzione di nuovi fornitori. Implica, quindi, un'analisi del rischio relativa all'ingresso di ciascun nuovo player, nonché una verifica di requisiti come capacità produttiva, certificazioni, disponibilità di manodopera, dotazione di tecnologie produttive, e affidabilità finanziaria. In tale ottica sono previsti dei test iniziali, un monitoraggio continuo del rispetto degli standard qualitativi e delle *delivery performance*⁵². L'attività di *derisking* implica poi l'eventuale adattamento dei rapporti con fornitori già presenti nella filiera. Un esempio di questo è il rafforzamento della relazione con le acciaierie, soprattutto per la fornitura di leghe speciali, come quella nickel-cobalto, particolarmente rilevante per le applicazioni militari. Lo scarso numero di attori in grado di assicurare queste forniture rende opportuno creare una relazione diretta con l'acciaieria, che solitamente sarebbe invece un partner *tier* due o tre⁵³. Se, dunque, da un lato si diversifica il portfolio dei fornitori per assicurare maggiore resilienza, dall'altro si rafforzano i legami con fornitori strategici il cui contributo alla filiera può essere difficilmente sostituito o integrato.

Al fine di assicurare un maggior controllo sulla filiera e di ridurre gli impatti di shock esterni, queste azioni di *derisking* devono essere declinate in un'ottica di *reshoring/nearshoring*. Con questo si fa riferimento alla necessità di accorciare la catena di approvvigionamento, riducendone l'estensione geografica. Questa esigenza risponde da un lato all'imperativo di limitare la sovraestensione di catene la cui lunghezza amplifica il rischio di rallentamenti o interruzioni, dall'altro, a fronte di un crescente protezionismo e di messa in discussione di un sistema economico e commerciale internazionale totalmente aperto, di limitare la dipendenza da attori con i quali potrebbero sorgere dei rapporti di conflittualità. Quest'ultimo aspetto è particolarmente importante per il conseguimento di un certo grado di autonomia strategica a livello europeo, assicurandosi che lo sviluppo e la produzione di tecnologie non siano dipendenti da relazioni di cooperazione con altri paesi che potrebbero essere

suscettibili di trasformazioni e stravolgimenti⁵⁴.

Un'altra criticità relativa alla resilienza della filiera produttiva è la volatilità della domanda, ulteriormente accentuata dall'incremento dell'incidenza di shock esterni. In particolare, in una filiera produttiva così complessa e articolata, le variazioni anche repentine della domanda hanno ripercussioni profonde che rischiano di protrarsi nel tempo. È, di conseguenza, necessario operare una stabilizzazione della domanda per quanto possibile, ad esempio concordando dei tempi minimi contrattuali in cui non sia possibile rivedere gli ordini, il che permetterebbe alle aziende di avere un periodo di *buffer* nel caso di shock che dovessero portare a variazioni nella domanda, attuando nel frattempo le misure necessarie⁵⁵.

4 Le implicazioni industriali dello sviluppo tecnologico

Lo sviluppo tecnologico, che include un crescente livello di digitalizzazione e un'integrazione sempre più ampia di nuovi processi produttivi, ha un impatto significativo sulle dinamiche di produzione e può contribuire a rafforzare la filiera aeronautica. L'*additive manufacturing*, ad esempio, permette di realizzare componenti tramite tecnologie di stampa 3D riducendo le tempistiche di produzione, minimizzando lo spreco di materiale e ridimensionando la dipendenza dai fornitori. Questo processo produttivo permette di realizzare componenti che altrimenti sarebbero il risultato di molteplici e distinte fasi produttive prima dell'assemblaggio o dell'integrazione. Permette inoltre di creare più agevolmente componenti con design e geometrie interne molto intricate, come ad esempio i canali di raffreddamento, fondamentali per la gestione termica, e di integrarli direttamente in altre componenti⁵⁶. Gli elementi realizzati tramite *additive manufacturing*

⁵⁴ Defence Industry Europe, *ASD Facts & Figures 2024: European Aerospace and Defence Industries Achieve Record Growth*, 21 Novembre 2024, <https://defence-industry.eu/asd-facts-figures-2024-european-aerospace-and-defence-industries-achieve-record-growth>.

⁵⁵ Intervista IAI, 11 giugno 2025.

⁵⁶ VisserPrecision, *Additive Manufacturing in Aerospace*, 8 marzo 2024, <https://visserprecision.com/blog/additive-manufacturing-in-aerospace>.



garantiscono una maggiore resistenza a fronte di un peso ridotto, migliorando l'efficienza del velivolo, sia sotto il profilo manutentivo sia in termini di consumi⁵⁷. L'*additive manufacturing*, in ambito aeronautico, è ad oggi applicato per la produzione di componenti innovativi di motori di ultima generazione. Alcuni esempi sono le pale in titanio-alluminio della turbina di bassa pressione del motore GE9X e diverse parti integrate del motore turboprop Catalyst. Avio Aero è stata tra i pionieri nell'applicazione di questa tecnologia in ambito aeronautico e, oggi, conta due centri di eccellenza produttiva presso gli stabilimenti di Cameri (NO) e di Brindisi, e un laboratorio di ricerca e sviluppo congiunto presso il campus del Politecnico di Torino.

Un ulteriore sviluppo tecnologico in ambito industriale è afferente al *machine learning*, che permette di perseguire una maggiore automazione. L'utilizzo di questa tecnologia consente ai macchinari di eseguire autonomamente operazioni complesse come avvitature e saldature, adattandosi alle specifiche delle geometrie e dei materiali, garantendo dunque flessibilità, mentre acquisiscono e integrano feedback in tempo reale⁵⁸. Nonostante una delle principali applicazioni sia quella dei processi meccanici che compongono il processo produttivo, il *machine learning* può essere applicato a una molteplicità di altri processi, come ad esempio le ispezioni, dunque la verifica del raggiungimento degli standard qualitativi richiesti⁵⁹. Un ostacolo significativo a una piena integrazione del *machine learning* in queste operazioni è, tuttavia, rappresentato dalle certificazioni di sicurezza, che nel campo aeronautico sono particolarmente stringenti. Il passaggio da un operatore umano a un sistema autonomo nello svolgimento di attività delicate e nelle quali eventuali errori possono avere conseguenze particolarmente gravi, rimane intrinsecamente legato a considerazioni di responsabilità. La decisione di GE Aerospace assunta nel 2024 di investire un miliardo di dollari nei successivi cinque anni per integrare strumenti di intelligenza artificiale nelle

⁵⁷ Intervista IAI, 1 luglio 2025.

⁵⁸ AxisCades, *Machine Learning & Artificial Intelligence in Aerospace Industry*, luglio 2019, <https://axiscades.com/wp-content/uploads/2023/08/Aerospace-whitepaper-1.pdf>.

⁵⁹ Intervista IAI, 1 luglio 2025.

sue strutture di *Maintenance, repair and overhaul* è a ogni modo emblematica di un'affermazione sempre maggiore di queste tecnologie anche per attività di ispezione⁶⁰.

Infine, un ulteriore avanzamento nelle dinamiche di produzione è legato al *digital thread*, un concetto ampiamente impiegato da Avio Aero. Si tratta dell'acquisizione e della condivisione di dati ingegneristici e di performance del prodotto che permettono di realizzare analisi complesse e soprattutto simulazioni, con un impatto sui costi, la velocità e la qualità dei processi di sviluppo del prodotto⁶¹. Il risultato è quindi la creazione di un *digital twin*, una versione digitale di un prodotto o di una componente che permette di superare i vincoli economici e fisici dei test convenzionali. Inoltre, la base di conoscenza così creata è facilmente condivisibile con i partner e gli stakeholder coinvolti nella filiera produttiva, un aspetto che sarà fondamentale, ad esempio, nello sviluppo del Gcap, pur con livelli di classificazione molto elevati⁶².

Le sfide tecnologiche che caratterizzano il campo della propulsione aeronautica, dall'elettrificazione alla riduzione delle emissioni, richiedono un approccio collaborativo allo sviluppo. Questo è dovuto in particolare al fatto che, rispetto al passato, l'innovazione tecnologica richiede oggi di coniugare discipline diverse ma complementari, come appunto quelle attinenti alla generazione e alla distribuzione di energia. In considerazione della complessità e delle inefficienze che comporterebbero l'acquisizione e la maturazione di simili competenze in modo autonomo, una valida soluzione è rappresentata dalla creazione di cluster, come ad esempio l'European Technology Development Cluster (E-Tdc), che fa capo ad Avio Aero e che raccoglie partner selezionati per sfide specifiche in strutture come i laboratori tematici⁶³.

⁶⁰ GE Aerospace, *GE Aerospace Deploys AI-driven Inspection Tool to Maximize Narrowbody Engine Time on Wing*, 13 febbraio 2025, <https://www.geaerospace.com/news/press-releases/ge-aerospace-deploys-ai-driven-inspection-tool-maximize-narrowbody-engine-time-wing>.

⁶¹ Bedon, Luca, "Common Thread", in *ANSYS Dimensions Magazine*, 2020, <https://www.ansys.com/dimensions-magazine/fall-2019/common-thread>.

⁶² Marrone, Alessandro, a cura di, "The New Partnership among Italy, Japan and the UK on the Global Combat Air Programme (GCAP)", cit.

⁶³ Sito Avio Aero: *Our R&D Network*, <https://www.aviaoero.com/aviation-innovation/r-d-network>.



Il cluster raccoglie soggetti diversificati, come università, centri di ricerca e piccole e medie imprese (Pmi) a livello europeo. Un esempio di questa rete è il laboratorio tematico sull'*additive manufacturing* di Torino, nel quale il personale di Avio Aero collabora con esperti dell'Università di Torino e dove alla ricerca sulle tecniche di stampa 3D si accompagnano dei percorsi di formazione per lo sviluppo di talenti. L'innovazione sviluppata in questi centri viene poi implementata da Avio Aero nei propri processi. Da questo punto di vista, il network fornisce solide garanzie sulla proprietà intellettuale maturata in questi contesti, vincolandone le future applicazioni⁶⁴.

L'E-Tdc contribuisce, inoltre, a formare e ad attirare talenti, un aspetto fondamentale in considerazione delle difficoltà delle industrie della propulsione aeronautica, e della difesa più in generale, nell'assicurarsi un adeguato numero di personale formato in discipline Stem (scientifiche, tecnologiche, ingegneristiche e matematiche) e di operai tecnici specializzati⁶⁵. Se da un lato, infatti, il rapido sviluppo tecnologico necessita di risorse altamente formate, anche in considerazione di programmi particolarmente intensivi a livello di risorse specializzate come il Gcap, dall'altro vi sono processi che non possono essere soggetti ad automazione, come ad esempio le saldature più complesse, e che dunque richiedono tecnici esperti. I saldatori devono avere competenze e manualità elevate, con un expertise che richiede tempi di maturazione lunghi per raggiungere gli standard necessari. Questo contribuisce all'alto grado di complessità nell'assicurarsi che i processi di assunzione di personale qualificato procedano con la velocità necessaria, in particolare in corrispondenza di momenti di *ramp up*⁶⁶.

Conclusioni

Nel XXI secolo il settore della propulsione aeronautica ha visto cambiare in modo radicale il contesto di riferimento.

⁶⁴ Intervista IAI, 2 luglio 2025.

⁶⁵ Monteleone, Stefano, "Le discipline STEM nella Difesa: innovazione e formazione per affrontare la complessità", in *Aviation Report*, 7 febbraio 2025, <https://www.aviation-report.com/?p=46147>.

⁶⁶ Intervista IAI, 1 luglio 2025.

In ambito civile è aumentata, a fianco della tradizionale spinta alla riduzione dei consumi, quella per limitare l'impatto ambientale sull'atmosfera e sull'inquinamento acustico (anche per la maggiore diffusione dei voli verso gli aeroporti minori, soprattutto da parte delle compagnie low-cost). Questo si sta traducendo nel più ampio impiego di carburanti sostenibili (Saf) e nello studio di sistemi di propulsione alternativi quali elettrici, ibridi o a idrogeno. In generale, la continua crescita del trasporto aereo, legata a molteplici fattori come riduzione dei costi, globalizzazione, sviluppo di nuove potenze mondiali o regionali, emigrazione qualificata, voli low-cost, turismo, ecc., sta favorendo un maggiore impegno in questa direzione.

In ambito militare è aumentata la sfida a cogestire insieme l'esigenza di *power and propulsion*. La capacità di produzione di energia è diventata, infatti, un elemento determinante per sviluppare l'*information superiority*, che si inscrive, ampliandolo, nel concetto di *air superiority*. Questo si riflette sia sull'incremento della sensoristica, volta all'acquisizione informativa in tempo reale, sia sull'elaborazione dell'informazione attraverso sistemi di intelligenza artificiale e quantistici, anch'essa in tempi molto ridotti e in modo autonomo rispetto al pilota, sia sulla capacità di condivisione delle informazioni con altre piattaforme, anche in altri domini. A sua volta quest'ultimo aspetto si inserisce nella logica del "sistema di sistemi", principale obiettivo dei velivoli di sesta generazione, in cui il caccia rappresenterà una piattaforma principale operante con il supporto di una serie di altri sistemi, prevalentemente senza pilota, i Cca. Lo sviluppo di un sistema di comunicazione di nuova generazione basato su tecnologia cloud, così come tecnologie afferenti all'*Internet of Things*, sarà cruciale per garantire la connessione della piattaforma principale con i Cca senza che questo gravi sul carico di lavoro del pilota. Di qui la necessità di una capacità di generazione, gestione e distribuzione dell'energia particolarmente complessa. Nel quadro della logica *power and propulsion* si dovrà affrontare la gestione della firma termica. A una maggiore produzione di energia, infatti, corrisponde inevitabilmente una maggiore emissione di calore, con un impatto



negativo sulla bassa osservabilità del velivolo sia nelle frequenze dell'infrarosso sia in quelle radar. Di qui un'attenzione specifica a materiali innovativi a bassa emissività, architetture in grado di massimizzare la dissipazione del calore tramite flussi d'aria in entrata e in uscita, nonché sistemi di gestione attiva del calore. Il cambio di paradigma in ambito militare dettato dalla sempre maggiore integrazione tra velivolo e sistema propulsivo richiede, quindi, una collaborazione sempre più stretta tra Forze Armate e controparte industriale, così come tra ingegneri, motoristi, equipaggiatori e velivolisti, affinché l'integrazione dei sottosistemi risulti coerente con l'intero progetto del velivolo.

Questa molteplicità di elementi esemplifica come la produzione e la gestione di energia sarà uno degli aspetti principali per i motori di nuova generazione. L'introduzione di propulsori avanzati non riguarda solo l'efficienza meccanica, ma implica trasformazioni profonde dell'intero sistema aeronautico, con una revisione delle configurazioni interne dei motori e dei velivoli che incide sulla gestione dei carichi, sulle interfacce elettroniche e sulle fonti energetiche. Per affrontare questa complessità è necessario un approccio che combini competenze meccaniche, elettriche e termodinamiche, supportato da strumenti di simulazione multi-fisica in grado di prevedere e ottimizzare le prestazioni complessive. Parallelamente, occorre riprogettare le architetture propulsive, puntando su soluzioni che migliorino produzione, distribuzione e conversione dell'energia attraverso l'integrazione di componenti elettrici ad alta potenza specifica e sistemi di controllo evoluti.

La filiera della propulsione aeronautica si caratterizza per estensione globale e forte concentrazione delle capacità di integrazione di sistemi nelle mani di pochi grandi player, soprattutto statunitensi. Questa configurazione rischia di avere conseguenze negative sulla resilienza, in particolare per l'Europa. Le competenze necessarie sono complesse e richiedono tempi di sviluppo molto lunghi, mentre la filiera è esposta a rischi geopolitici che possono tradursi in conflitti, restrizioni commerciali o dazi capaci di rallentare o interrompere i flussi di approvvigionamento. La presenza di monopoli

e oligopoly amplifica la fragilità del sistema: una crisi di un singolo attore si ripercuote sull'intero settore. Anche la disponibilità delle necessarie materie prime rappresenta un ulteriore punto di vulnerabilità, costituendo il primo anello della catena produttiva.

Per mitigare questi rischi diventa essenziale un'attività di *derisking* che includa la diversificazione del portfolio dei fornitori, la valutazione dei loro requisiti e il rafforzamento dei rapporti con quelli strategici. È il caso delle acciaierie produttrici di leghe speciali, fondamentali per applicazioni militari, con cui è opportuno instaurare relazioni dirette. In un'ottica di maggiore controllo sulla filiera e di riduzione della dipendenza da attori esterni, tali azioni devono accompagnarsi a strategie di *reshoring* e *nearshoring*, accorciando la catena di approvvigionamento e rafforzando l'autonomia strategica europea. Un ulteriore elemento cruciale è la stabilizzazione della domanda, poiché variazioni improvvise generano effetti destabilizzanti che possono protrarsi a lungo: per questo, contratti con tempi minimi prima di modificare gli ordini potrebbero fornire maggiore prevedibilità e consentire una pianificazione più efficace.

Sul piano tecnologico, l'innovazione digitale sta trasformando le dinamiche produttive. L'*additive manufacturing*, grazie alla stampa 3D, riduce tempi e costi, limita sprechi e dipendenza dai fornitori e consente di realizzare componenti complessi come i canali di raffreddamento, integrandoli direttamente in altri elementi. I pezzi così prodotti risultano più leggeri e resistenti, con vantaggi in termini di manutenzione, consumi ed efficienza complessiva. Parallelamente, l'intelligenza artificiale e il *machine learning* favoriscono l'automazione dei processi: i macchinari possono eseguire autonomamente operazioni complesse come saldature e avvitature, adattarsi ai materiali e integrare feedback in tempo reale, arrivando anche a supportare le attività di ispezione e controllo qualità. Le stringenti certificazioni di sicurezza nel settore aeronautico costituiscono, però, un ostacolo a una piena integrazione, poiché la sostituzione dell'operatore umano introduce complicazioni in termini di responsabilità in caso di errori. Tuttavia, investimenti come quello



annunciato da GE Aerospace, che ha destinato un miliardo di dollari all'integrazione dell'IA nei processi di manutenzione e ispezione, mostrano la crescente diffusione di queste tecnologie.

Un'ulteriore innovazione è rappresentata dal *digital thread*, sviluppato da GE Aerospace e adottato da Avio Aero, che permette di raccogliere e condividere dati ingegneristici e prestazionali con impatti positivi su tempi, costi e qualità dello sviluppo. Questo approccio porta alla creazione del *digital twin*, una replica digitale di un prodotto o componente che consente test e simulazioni senza i vincoli economici e fisici delle prove tradizionali. La base di conoscenza così creata è facilmente condivisibile con partner e stakeholder, fattore cruciale per programmi collaborativi complessi come il Gcap.

Le sfide della propulsione aeronautica, dall'elettrificazione alla riduzione delle emissioni, richiedono dunque un approccio collaborativo capace di integrare discipline diverse. L'acquisizione autonoma di competenze così articolate risulterebbe inefficiente, motivo per cui i cluster tecnologici si presentano come una soluzione efficace. L'European Technology Development Cluster, guidato da Avio Aero, ne è un esempio: raccoglie università, centri di ricerca e Pmi europee per affrontare sfide specifiche in laboratori tematici, come quello di Torino sull'*additive manufacturing*, dove ricerca e formazione convivono e i risultati vengono trasferiti ai processi industriali. Questi cluster non solo stimolano l'innovazione, ma contribuiscono anche ad attrarre e formare talenti, un fattore cruciale in un settore che fatica a reperire personale con competenze Stem e manodopera tecnica specializzata.

Sul piano tecnologico e industriale il settore della propulsione aeronautica italiano ha raggiunto un significativo livello di maturità e competitività. I suoi maggiori punti di forza possono essere così schematizzati:

- La struttura industriale è da molto tempo consolidata con un grande gruppo al vertice, Avio Aero, e importanti subfornitori al secondo e terzo tier della filiera produttiva.
- Avio Aero ha una presenza significativa nei più importanti programmi di collaborazione europea nel campo militare e una proiezione

internazionale nel campo civile.

- L'azienda ha anche una presenza distribuita sul territorio nazionale avendo favorito la nascita e il rafforzamento di tre aree di eccellenza tecnologica a Torino, Napoli e Brindisi, con un vasto coinvolgimento di Pmi e università.
- La collaborazione tra industrie e mondo accademico coinvolge, per altro, anche molte altre università in diversi campi e discipline, dovendo rispondere alle esigenze della logica *power and propulsion*.
- Avio Aero ha sostenuto la costituzione di un esemplare cluster europeo, l'European Technology Development Cluster (E-Tdc), che raccoglie partner selezionati all'interno di laboratori tematici a livello europeo.
- Infine, l'azienda è la capofila della presenza tecnologica e industriale in Europa di uno dei principali gruppi internazionali nel settore della propulsione aeronautica, GE Aerospace. Anche grazie a questo ruolo è riuscita a sviluppare il primo motore turbo-prop europeo di questo dopoguerra, il Catalyst, completamente Itar-free.

Tutti questi elementi confermano la strategicità del settore sia ambito nazionale che europeo, con forti ricadute politiche, occupazionali, tecnologiche, industriali e militari.

Tale livello di maturità e competitività è stato raggiunto anche grazie al sostegno pluriennale alla ricerca e all'innovazione tecnologica assicurato a livello nazionale da parte del Ministero delle Imprese e del Made in Italy (precedentemente Ministero dell'Industria e poi dello Sviluppo economico) e del Ministero della Difesa e, a livello locale, delle Regioni interessate, ma anche dei programmi di ricerca e sviluppo europei civili e militari. Anche da qui la necessità che siano assicurate la continuità e la pianificazione degli investimenti attraverso gli attuali e nuovi strumenti di finanziamento che vadano nella direzione di supportare sia la ricerca e sviluppo che l'aumento della capacità produttiva, alla luce del ciclo di vita lungo e complesso che caratterizza il settore aeronautico.

A stabilizzare il settore ha contribuito anche l'approvazione della normativa sul Golden Power introdotta nel 2012, che ha conferito al governo



poteri speciali nei settori strategici al fine di tutelare l'interesse nazionale. L'acquisto di Avio Aero da parte di GE Aerospace viene definito nello stesso anno e concluso nell'agosto 2013, con la contemporanea emanazione del primo Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri in cui viene applicata questa normativa. A partire da questo momento, l'identità italiana di Avio Aero è stata tutelata dal Governo e garantita anche rispetto alle iniziative dell'Unione europea a cui ha potuto partecipare.

Questo settore rappresenta, quindi, un valido esempio di come si possano tutelare gli interessi nazionali con una stretta collaborazione pubblico-privato, con un efficace punto di equilibrio fra internazionalizzazione e mantenimento dell'identità nazionale, con un'attività civile-militare fortemente orientata all'innovazione tecnologica e alla collaborazione fra grande e piccola-media industria, università e centri di ricerca. Può, quindi, essere considerato un modello di riferimento per tutelare le non molte aree di eccellenza tecnologica nel settore dell'aerospazio, sicurezza e difesa. Come tale richiede solo che continui ad essere seguito e supportato come fatto fino ad oggi.

aggiornato 15 ottobre 2025

L'Istituto Affari Internazionali (IAI) è un think tank indipendente, privato e non-profit, fondato nel 1965 su iniziativa di Altiero Spinelli. Lo IAI mira a promuovere la conoscenza della politica internazionale e a contribuire all'avanzamento dell'integrazione europea e della cooperazione multilaterale. Si occupa di temi internazionali di rilevanza strategica quali: integrazione europea, sicurezza e difesa, economia internazionale e governance globale, energia e clima, politica estera italiana; e delle dinamiche di cooperazione e conflitto nelle principali aree geopolitiche come Mediterraneo e Medioriente, Asia, Eurasia, Africa e Americhe. Lo IAI pubblica una rivista trimestrale in lingua inglese (*The International Spectator*), una online in italiano (*Affarinternazionali*), due collane di libri (*Trends and Perspectives in International Politics* e *IAI Research Studies*) e varie collane di paper legati ai progetti di ricerca (*Documenti IAI*, *IAI Papers*, ecc.).

Via dei Montecatini, 17
I-00186 Roma, Italia

T +39 06 6976831

www.iai.it

Ultimi Documenti IAI

Direttore: **Alessandro Marrone** (a.marrone@iai.it)

ISSN 2280-6164

- 25 | 12** Nicolò Murgia, Alessandro Marrone e Michele Nones, *Le nuove frontiere della propulsione aeronautica tra sfide tecnologiche, sostenibilità ambientale e sicurezza nazionale*
- 25 | 11** Elio Calcagno e Michele Nones, *L'ambiente subacqueo come motore di innovazione tecnologica*
- 25 | 10** Federico Castiglioni, *Van Wittel/Vanvitelli Roundtable and Business Forum Report*
- 25 | 09** Francesca Maremonti, *From the Indo-Pacific to the Enlarged Mediterranean: India's Economic Rise and Strategic Cooperation with the EU and Italy*
- 25 | 08** Matteo Bonomi and Luisa Chiodi, *Advancing EU Enlargement to the Western Balkans: Aligning Expectations and Realities*
- 25 | 07** Alessandro Marrone, *NATO and European Defence during the Trump Administration: A Stocktaking*
- 25 | 06** Federico Castiglioni, *European Competitiveness at Stake: Industrial and Technological Challenges*
- 25 | 05** Alessandro Marrone e Michele Nones, *La nuova partnership tra Italia, Regno Unito e Giappone sul Global Combat Air Programme (Gcap)*
- 25 | 04** Marianna Lunardini and Matteo Bursi, *The Role of the Private Sector in the Global Health Agenda*
- 25 | 03** Alessandro Marrone (ed.), *The New Partnership among Italy, Japan and the UK on the Global Combat Air Programme (GCAP)*