

## Mobilità sostenibile a idrogeno

Il laboratorio S-MoVe (Veicoli per la mobilità sostenibile) dell'Università del Salento svolge attività didattica, di ricerca e terza missione sulla progettazione, analisi e ottimizzazione di sistemi di trasporto ad idrogeno, con lo scopo di affrontare e risolvere le problematiche tecnologiche associate all'utilizzo delle celle a combustibile in condizioni di carico altamente variabile. Le attività di ricerca in corso, qui presentate, sono svolte nell'ambito del Centro Nazionale per la Mobilità Sostenibile (MOST) e di progetti in collaborazione con il Distretto Tecnologico Aerospaziale.

### SUSTAINABLE HYDROGEN-POWERED MOBILITY

The S-MoVe (Vehicles for Sustainable Mobility) Laboratory at the University of Salento conducts teaching, research, knowledge transfer and public engagement on the design, analysis, and optimization of hydrogen transport systems, with the aim of addressing and resolving the technological challenges associated with the use of fuel cells under highly variable load conditions. The ongoing research activities presented here are conducted within the National Center for Sustainable Mobility (MOST) and through projects in collaboration with the Aerospace Technology District (DTA).

### Introduzione

La transizione verso una mobilità sostenibile rappresenta una delle principali sfide tecnologiche e ambientali del XXI secolo. La necessità di ridurre le emissioni climalteranti e la dipendenza dai combustibili fossili ha spinto governi, industria e ricerca ad esplorare soluzioni energetiche alternative per il settore dei trasporti. In questo contesto, l'idrogeno si sta affermando come un vettore energetico strategico grazie alla sua elevata energia per unità di massa, alla possibilità di essere prodotto da fonti rinnovabili e alla totale assenza di emissioni di CO<sub>2</sub> durante l'utilizzo.

Nel trasporto su strada, i veicoli a celle a combustibile uniscono l'efficienza dei veicoli elettrici all'autonomia dei motori tradizionali. I recenti progressi nelle celle a combustibile PEMFC e nelle infrastrutture di rifornimento rendono l'idrogeno una valida alternativa all'elettrificazione diretta, soprattutto per veicoli pesanti e a lunga percorrenza, dove peso e tempi di ricarica delle batterie restano critici. Anche nel settore aeronautico, dove l'obiettivo è l'eliminazione progressiva dei motori alimentati da combustibili fossili in tutti i tipi di aeromobili entro il 2050, l'idrogeno sta emergendo come una delle alternative più promettenti per la decarbonizzazione del volo. Benché siano stati proposti sistemi di propulsione elettrica a batteria per piccoli velivoli senza pilota (UAV) e per aeromobili leggeri a corto raggio, l'attuale densità energetica delle batterie non è sufficiente a garantire l'autonomia di volo desiderata in applicazioni a medio e lungo raggio.

Tra le varie tipologie di celle a combustibile, le celle a membrana a scambio protonico (PEMFC) sono le più utilizzate nel settore dei trasporti grazie alla loro migliore efficienza e potenza specifica. Per potenze inferiori a 6 kW si utilizzano celle PEMFC con catodo aperto e raffreddamento ad aria. Per potenze superiori, si ricorre generalmente a PEMFC raffreddate a liquido, come nei progetti ENFICA-FC [1] e Sigma-4 [2]. Tuttavia, alcuni studi hanno indagato la possibilità di estendere il campo operativo delle celle a combustibile raffreddate

ad aria fino a 10 kW, come dimostrato nei progetti Antares [3] e H2fly [4]. Il raffreddamento ad aria offre vantaggi quali una minore complessità del sistema e un numero ridotto di componenti.

A differenza dei motori termici ad idrogeno — che producono ossidi di azoto — le PEMFC sono dispositivi silenziosi, privi di vibrazioni e a zero emissioni. Tuttavia, le celle a combustibile devono essere integrate con batterie in configurazioni ibride-elettriche, al fine di combinare i vantaggi di entrambe le tecnologie e, in particolare, risolvere il problema della lenta risposta della cella a combustibile a variazioni di carico. Inoltre, le loro prestazioni sono fortemente influenzate dalle condizioni ambientali, aspetto cruciale nell'applicazione alla propulsione aerea. Il laboratorio S-MoVe dell'Università del Salento affronta le problematiche tecnologiche legate all'impiego delle celle a combustibile come sistemi energetici completi, studiandone il comportamento in condizioni di carico variabile e condizioni ambiente tipiche delle applicazioni aeronautiche. Dal punto di vista didattico, oltre a corsi, seminari e tesi di laurea, il laboratorio supporta il team studentesco UNISALENTO HYDRO PROJECT nella realizzazione di una automobile ad idrogeno in scala 1:10 per la partecipazione alla competizione internazionale H<sub>2</sub>GP. Infine, propone laboratori didattici e percorsi di alternanza scuola-lavoro sul tema della mobilità sostenibile ad idrogeno.

### Il progetto SERENA

Il progetto SERENA, acronimo per Sviluppo di architetture propulsive ad Emissioni zeRo per l'Aviazione gENerAle, è un progetto Finanziato dal Ministero dell'Innovazione Tecnologica con 2,5 milioni di euro. Il progetto ha l'obiettivo di sviluppare un sistema di propulsione completamente elettrico e modulare, integrando sistemi a batteria con tecnologia a celle a combustibile alimentate a idrogeno. L'approccio modulare consente di ottenere soluzioni propulsive scalabili su un ampio intervallo di requisiti di potenza, garantendo flessibilità operativa

in diversi scenari e possibilità di aggiornamenti futuri. I partner dell'Università del Salento nel progetto SERENA sono il Distretto Tecnologico Aerospaziale (DTA-Scarl), EnginSoft S.p.A. e Novotec S.R.L..

Le principali attività previste dal progetto riguardano:

- I. Lo sviluppo di un sistema di propulsione ibrido-elettrico modulare basato sull'idrogeno.
- II. La valutazione dell'impatto ambientale mediante un approccio well-to-wheel.
- III. La progettazione, assemblaggio, verifica e validazione di un dimostratore in scala ridotta.
- IV. L'esecuzione di prove a banco sul dimostratore.
- V. La creazione di un gemello digitale o digital twin del sistema di propulsione in scala reale.
- VI. L'integrazione virtuale del sistema a idrogeno nel velivolo di riferimento, al fine di verificarne fattibilità e prestazioni.
- VII. La definizione delle problematiche di sicurezza e certificazione connesse all'impiego di idrogeno compresso

Il velivolo di riferimento per il progetto è il Seagull, un aeromobile anfibo ad ala alta biposto, dotato di propulsore a elica azionato da motore a pistoni (Figura 1). Il dimensionamento del sistema è stato eseguito mediante una procedura di ottimizzazione, basata sui requisiti di una missione tipica con quota massima di volo pari a 1800 m, che ha portato a individuare una taglia minima di 36kW per la cella a combustibile e 5kWh per la batteria (LFP). Il sistema è completato da un serbatoio di idrogeno compresso a 700bar da 60L.

La configurazione ibrida-elettrica aumenta la sicurezza operativa, poiché la batteria può fornire energia di riserva in caso di guasto della cella a combustibile. Questa caratteristica è particolarmente importante nell'aviazione ultraleggera, dove i guasti dell'unico motore termico rappresentano una causa frequente di incidenti mortali [5][5]. Tuttavia, l'uso dell'idrogeno introduce nuove sfide di sicurezza, che richiedono un'attenta progettazione e un accurato controllo di tutto il sistema di gestione dell'idrogeno. Tali aspetti sono affrontati nell'ambito del progetto SERENA [6].

In termini di emissioni dirette, il nuovo sistema di propulsione consente un risparmio di circa 22 kg di CO<sub>2</sub>, 1,12 g di idrocarburi (HC), 15 g di monossido di carbonio (CO), 87 g di ossidi di azoto (NO<sub>x</sub>) e 5,3 g di particolato durante un volo di 90 minuti, eliminando inoltre comple-

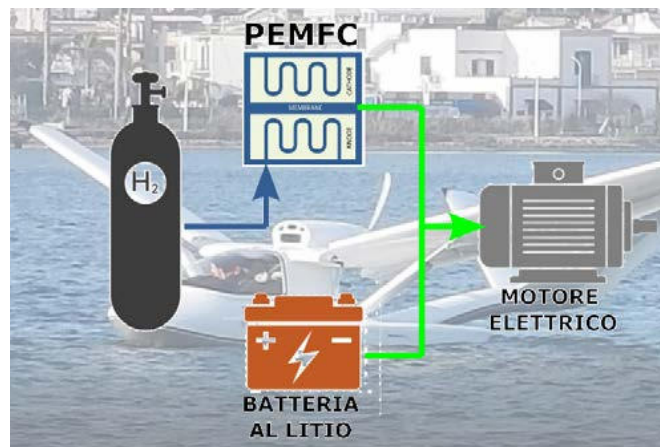


FIGURA 1 - Velivolo di riferimento e sistema propulsivo proposto

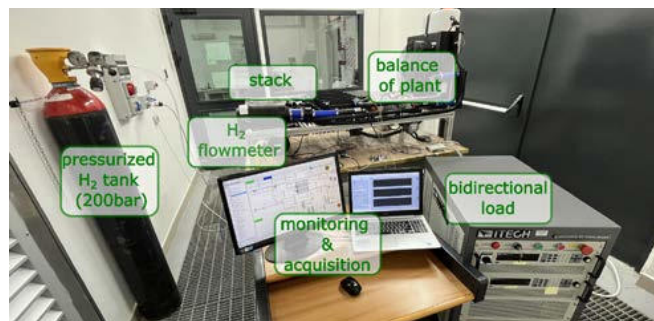
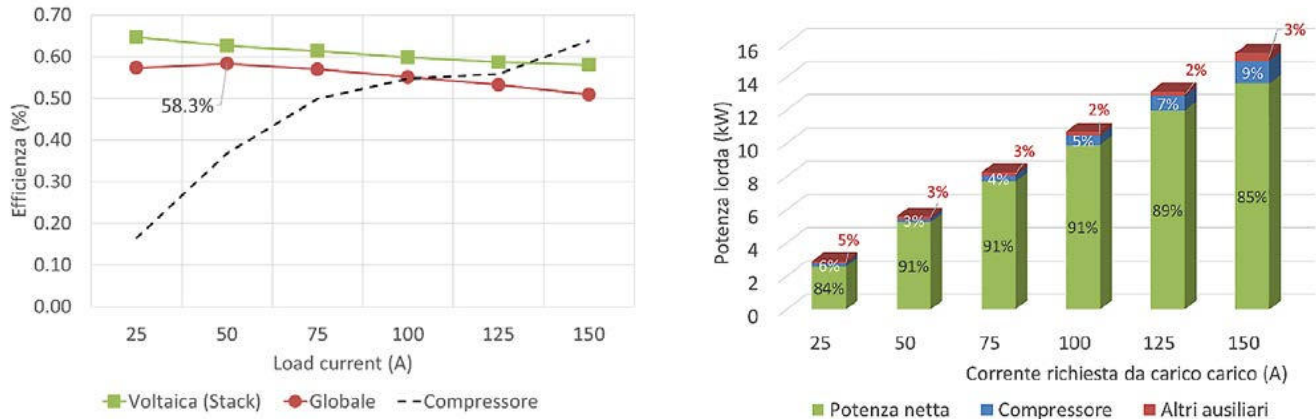


FIGURA 2 - Setup sperimentale

tamente le emissioni di piombo. In termini di emissioni well-to-wing, il nuovo sistema consente un risparmio fino a 266 g di CO<sub>2</sub> per minuto di volo nel caso di impiego di idrogeno verde, prodotto mediante energia eolica. Con idrogeno grigio, invece, il risparmio di CO<sub>2</sub> si riduce a 56 g per minuto, e le emissioni complessive di composti organici volatili (VOC) risultano superiori rispetto alla configurazione alimentata a benzina. I dettagli relativi alla metodologia di stima delle emissioni sono riportati in [7][5].

Partendo dal dimensionamento di massima del powertrain, è stata acquisita una PEMFC da 20 kW raffreddata ad acqua, costituita da 144 celle in serie e da un complesso sistema di alimentazione e raffreddamento (balance of plant o BOP). Per caratterizzare la cella e l'intero BOP è stato allestito un opportuno setup sperimentale (Figura 2). Il BOP è stato progettato a scopo di ricerca, pertanto è dotato di numerosi sensori per la misura di pressione, temperatura, portata e altri parametri di funzionamento, e presenta un accesso aperto che consente la modifica sia dell'hardware sia delle utilità software. Per la stessa ragione, il compressore e gli altri componenti ausiliari sono alimentati da una fonte di alimentazione separata. Per testare il sistema in condizioni rappresentative di una tipica missione di volo, è stato acquisito un carico elettronico bidirezionale, costituito da due moduli, ciascuno con potenza nominale di 18 kW. Grazie alla modularità e alla bidirezionalità del carico elettronico programmabile, è possibile eseguire diverse tipologie di prove per la caratterizzazione del sistema di propulsione ibrido-elettrico. I due moduli del carico possono essere utilizzati per caratterizzare separatamente i sistemi a cella a combustibile o i pacchi batteria, fino a una potenza complessiva di 36 kW. Essi possono essere utilizzati anche come emulatori per testare l'intero sistema propulsivo, includendo anche il motore elettrico. Infine, l'emulatore può essere impiegato per emulare il solo comportamento della batteria.

I principali risultati del test della cella a combustibile in condizioni stazionarie, ottenuti con valori della corrente di carico da 25° A 150°, sono mostrati in Figura 3. In particolare, il grafico a sinistra confronta il rendimento voltaico della cella, che tiene conto solo delle perdite nello stack, con il rendimento globale che quantifica anche le perdite di potenza nel BOP, i cui contributi che sono dettagliati nel grafico a destra. Si può notare come la potenza netta trasferita all'utilizzatore varia tra l'84% e il 91% della potenza lorda prodotta dallo stack. Le perdite di potenza sono dovute principalmente al compressore di alimentazione dell'aria, il cui contributo percentuale varia con la corrente. In termini assoluti, al crescere della corrente richiesta dal carico, aumen-



**FIGURA 3 - Principali risultati del test della cella in condizioni stazionarie**

tano sia la portata del compressore, sia il suo rapporto di compressione mentre il rendimento migliora come mostrato nel grafico a sinistra. È fondamentale osservare che, a differenza di quanto tipicamente assunto per una cella a combustibile a catodo chiuso, la pressione nello stack non è costante, ma aumenta con la portata di aria a causa delle perdite di carico nell'intera linea. Di conseguenza, l'efficienza della PEMFC è influenzata anche dalla strategia di controllo del compressore che va opportunamente ottimizzata.

I dati acquisiti in questi test sono stati utilizzati per caratterizzare i componenti del circuito dell'aria e simularlo in ambiente Matlab/Simscape. In questo modo è stato possibile stimare la perdita di potenza della cella a combustibile in quota. Dai risultati è emerso che l'effetto della quota di volo è più rilevante ai bassi carichi. Alla corrente di 25 A, l'aumento della quota dal livello del mare a 2000 m comporta un incremento più del doppio della potenza parassita del compressore (+150%), mentre a

carico più elevato, 150 A, l'incremento è relativamente inferiore (+61%) ma comunque rilevante. Questi risultati sono particolarmente rilevanti in quanto spesso l'effetto della quota sulla PEMFC e sul suo BOP sono trascurati nella letteratura di riferimento.

### Attività nell'ambito del Centro Nazionale per la Mobilità Sostenibile (MOST-Spoke 14) e Grottaglie Airport Test Bed (GATB).

Il Centro Nazionale per la Mobilità Sostenibile (MOST) è un ente di ricerca italiano creato a giugno 2022 per promuovere la ricerca, l'innovazione e l'implementazione di soluzioni di mobilità più sostenibili, digitali e inclusive per tutto il territorio nazionale. Lo spoke 14, in particolare, si concentra sull'idrogeno e i nuovi combustibili. Le attività svolte dal laboratorio S-MoVe nell'ambito di tale progetto hanno riguardato la caratterizzazione di un sistema propulsivo per un drone,

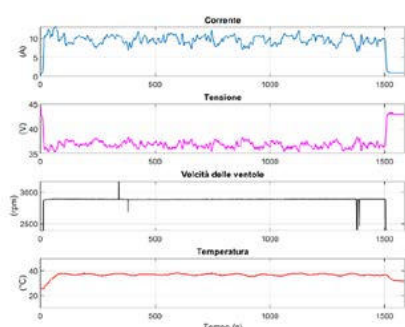
#### a. Setup sperimentale per la caratterizzazione al livello del mare



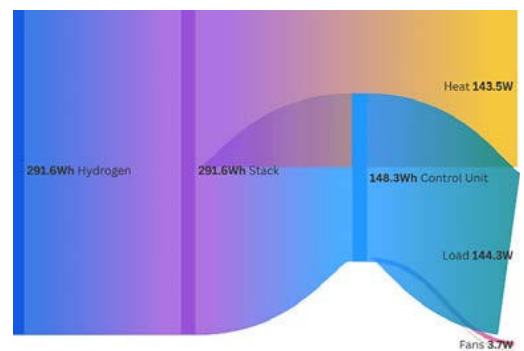
#### b. Camera altimetrica per i test in quota simulate (fino a 2000m)



#### c. Riproduzione del profilo di missione di un tipico volo del drone



#### d. Diagramma di Sankey della cella a combustibile durante l'intera missione di volo (25 min)



**FIGURA 4 - Test sperimentali sul Sistema propulsivo ad idrogeno di un drone (1kW)**

### Unisalento Hydro Project alla finale della gara internazionale H2GP Prototype



### Festival Grandimenti 2025



**FIGURA 5 - Attività didattiche e public engagement**

simile a quello descritto in precedenza ma comprendente una cella a combustibile raffreddata ad aria, essendo le potenze in gioco molto più basse, e un supercondensatore al posto della batteria. Anche in questo caso è stato allestito un apposito banco di prova, riportato in Figura 4a), per la caratterizzazione completa del sistema propulsivo in condizioni ambiente. Inoltre, è stata acquisita, nell'ambito dell'infrastruttura di ricerca "Grottaglie Airport Test Bed", una camera altimetrica in grado di emulare una quota variabile dal livello del mare fino a 2000m. La camera, mostrata in Figura 4b), è progettata in modo da consentire l'inserimento all'interno di essa dell'intero setup sperimentale riportato nella Figura 4a). La figura mostra anche i risultati relativi ad un test di volo simulato in termini di comportamento dinamico, Figura 4c), e di bilancio energetico lungo l'intera missione di volo, Figura 4d).

### Didattica e terza missione

Considerata l'importanza strategica dell'idrogeno, è essenziale formare oggi le competenze necessarie alla transizione energetica di domani. Per questo motivo, le attività di ricerca del laboratorio S-MoVe sono affiancate da iniziative di formazione e public engagement (Figura 5). Gli studenti e le studentesse del corso di laurea magistrale in Ingegneria Meccanica, indirizzo "Ingegneria del Veicolo" acquisiscono competenze metodologiche, tecnologiche e modellistiche sui sistemi avanzati di propulsione e le applicano al dimensionamento e all'ottimizzazione della gestione energetica di veicoli ad idrogeno, nell'ambito dell'insegnamento "Sistemi Avanzati di Propulsione". In questo modo, i giovani studenti universitari, possono diventare professionisti in grado di sviluppare e migliorare le tecnologie dell'idrogeno.

Il laboratorio S-MoVe, inoltre, supporta il team studentesco Unisalento Hydro Project nella partecipazione alla competizione internazionale H2GPpro, un programma educativo internazionale in cui le studentesse e gli studenti affrontano la sfida di progettare, costruire e far gareggiare vetture in scala 1:10 alimentate ad idrogeno. Alla sua prima partecipazione, il team ha ottenuto brillanti risultati, ricevendo il premio Promo e classificandosi al secondo posto per efficienza energetica.

A livello di public engagement, oltre alla partecipazione alla Notte Europea dei Ricercatori, si propongono laboratori rivolti alle scuole primarie e secondarie di primo grado e percorsi PCTO agli studenti e alle studentesse delle scuole secondarie di secondo grado, con apprendimento hands-on. In questo modo i ragazzi, a loro volta, diffondono i principi della mobilità sostenibile all'interno delle proprie famiglie e del-

la comunità. I cittadini, comprendendone i benefici ambientali e le opportunità economiche, saranno più propensi ad accettare investimenti e infrastrutture legate all'idrogeno (stazioni di rifornimento, impianti di elettrolisi ecc.).

### Conclusioni

Le attività presentate testimoniano l'impegno del Laboratorio S-MoVe dell'Università del Salento nello sviluppo di sistemi propulsivi a idrogeno per applicazioni terrestri e aeronautiche, in un'ottica di sostenibilità e innovazione tecnologica. I risultati sperimentali ottenuti nell'ambito del progetto SERENA hanno confermato la fattibilità di architetture ibride basate su celle a combustibile di tipo PEM, evidenziando al contempo l'importanza della gestione dei sistemi ausiliari per massimizzare l'efficienza complessiva. Le attrezzature sperimentali acquisite, tra cui la camera altimetrica del "Grottaglie Airport Test Bed", permettono di quantificare le perdite di potenza e gli effetti della quota di volo, fornendo dati preziosi per la validazione dei modelli numerici e per la progettazione di futuri dimostratori. L'integrazione tra ricerca, formazione e divulgazione rappresenta un elemento distintivo del laboratorio, che contribuisce alla crescita di competenze nel settore della mobilità sostenibile e alla diffusione della cultura dell'idrogeno tra studenti e cittadini. Le prospettive di sviluppo riguardano ora l'ottimizzazione delle strategie di controllo del sistema propulsivo ibrido elettrico, l'impiego di idrogeno verde e l'estensione delle attività sperimentali a sistemi di maggiore scala e complessità.

### Bibliografia

- [1] Romeo G, Cestino E, Correa G, Borello F 2011, A fuel cell based propulsion system for general aviation aircraft: The ENFICA-FC experience, SAE Int. J. Aerosp. 4 724-737 <https://doi.org/10.4271/2011-01-2522>.
- [2] Geliev A V, Varyukhin A N, Zakharchenko V S, Kiselev I O, Zhuravlev D I 2019, Conceptual design of an electric propulsion system based on fuel cells for an ultralight manned aircraft, International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS) Ufa Russia 21-25 October 2019 pp. 1-17 <https://doi.org/10.1109/ICOECS46375.2019.8949950>.
- [3] Rathke P, Thalau O, Kallo J, Schirmer J, Stephan T 2013, ong distance flight testing with the fuel cell powered aircraft Antares DLR-H2, Proceedings of the Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress Stuttgart, Germany 10-12 September 2013 p. 301219.
- [4] Marx N, Boulou L, Gustin F, Hissel D, Agbossou K. 2014, Comparison of the series and parallel architectures for hybrid multi-stack fuel cell-Battery systems, Int J Hydrogen Energy 39(23) 12101-11.
- [5] Donateo T, Spada Chiodo L 2023, Design and reliability analysis of a series/parallel hybrid system with a rotary engine for safer ultralight aviation, Applied Sciences 13(7) 4155.
- [6] Corti M., Lecce L, Evaluating and reducing the risk of hydrogen leakage in an aircraft cabin using CFD analysis, Futurities, Spring 2025, pp. 24-27
- [7] Donateo T, Bonatesta A G, Ficarella A, Lecce L 2024, Energy Consumption and Saved Emissions of a Hydrogen Power System for Ultralight Aviation: A Case Study, Energies 17 (13), 3272.