



## E2.1. INTRODUCTION

Prof. Enrico Zappino  
[enrico.zappino@polito.it](mailto:enrico.zappino@polito.it)  
Ing. Giuseppe Palaia  
[giuseppe.palaia@polito.it](mailto:giuseppe.palaia@polito.it)  
Ing. Karim Abu Salem  
[karim.abusalem@polito.it](mailto:karim.abusalem@polito.it)

Progettazione di veicoli  
aerospaziali (AA-LZ)

E2. Conceptual Design of  
hybrid regional  
aircraft

# Flightpath 2050 Europe's Vision for Aviation



- 1. In 2050 technologies and procedures available allow a **75% reduction in CO<sub>2</sub>** emissions per passenger kilometer to support the ATAG target<sup>10</sup> and a **90% reduction in NOx emissions**. The perceived **noise emission** of flying aircraft is **reduced by 65%**. These are relative to the capabilities of typical new aircraft in 2000.
- 2. Aircraft movements are **emission-free when taxiing**.
- 3. Air vehicles are designed and manufactured to be recyclable.
- **90% of travellers within Europe are able to complete their journey, door-to-door within 4 hours**. Passengers and freight are able to transfer seamlessly between transport modes to reach the final destination smoothly, predictably and on-time



© AIRBUS S.A.S. 2010 - All rights reserved - EIAI

Flightpath 2050  
Europe's vision for aviation : maintaining  
global leadership and serving society's needs  
<https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/modes/air/doc/flightpath2050.pdf>

# PROPULSIONE IBRIDA



<https://mahepa.eu/>

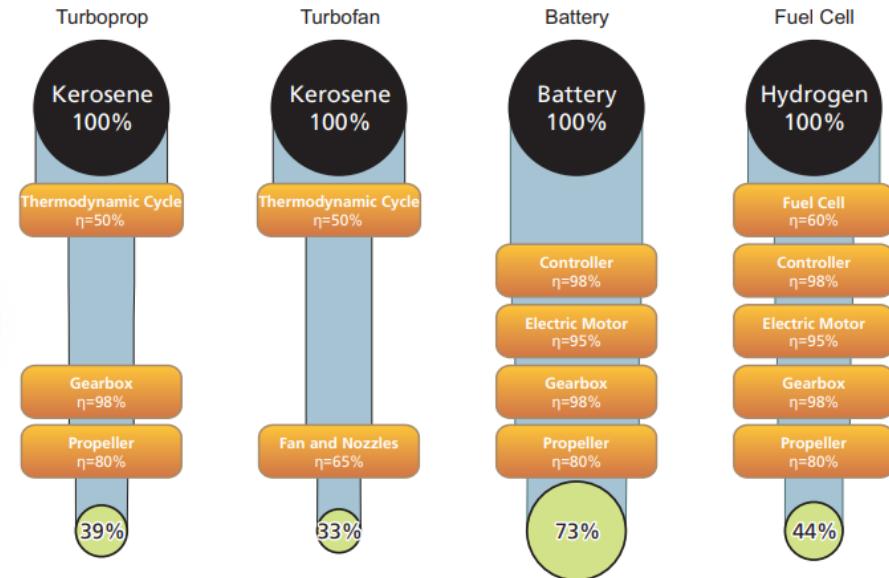
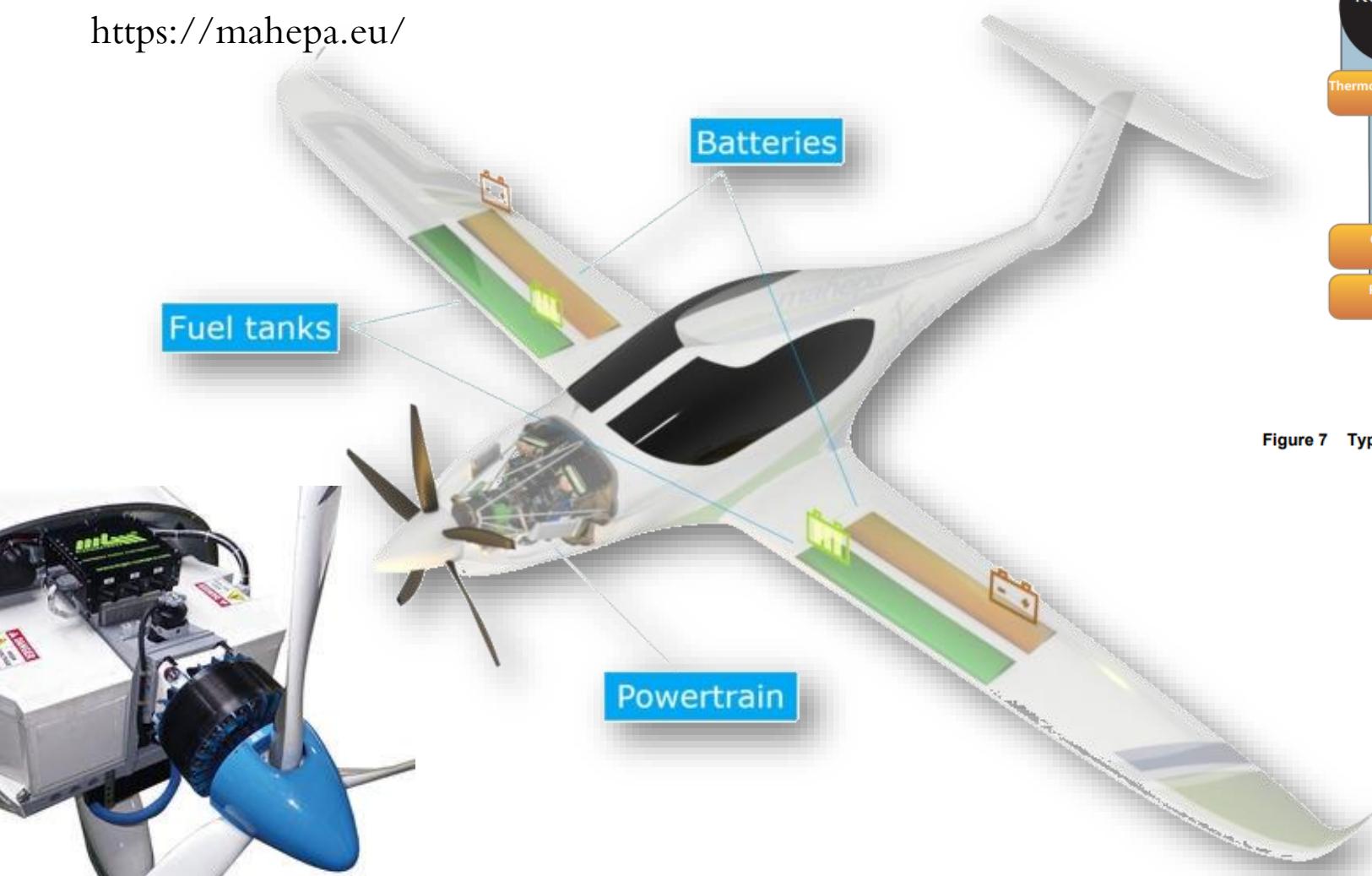


Figure 7 Typical on-board conversion chains with typical component efficiencies and total chain efficiency.



# IMPATTO PROPULSIONE IBRIDA



- Riduzione delle Emissioni Inquinanti
  - I velivoli ibridi possono ridurre significativamente le emissioni di CO<sub>2</sub> e NOx, soprattutto nelle fasi di decollo e atterraggio, dove si possono utilizzare motori elettrici anziché a combustione. Questo contribuisce alla sostenibilità ambientale e si allinea agli obiettivi di decarbonizzazione del settore aeronautico.
  - Contribuisce alla lotta contro il cambiamento climatico e riduce l'impatto ambientale complessivo dell'aviazione.
- Maggiore Efficienza Energetica
  - Nei sistemi ibridi, il motore a combustione può operare a velocità costante nelle fasi di crociera, mantenendosi al punto di massima efficienza. Durante fasi di alta richiesta, come decollo e salita, i motori elettrici forniscono potenza supplementare, riducendo il consumo di carburante.
  - Riduce i consumi complessivi e abbassa i costi operativi, migliorando l'economia del volo.
- Minore Inquinamento Acustico
  - I motori elettrici sono più silenziosi rispetto ai motori a combustione, il che rende i velivoli ibridi meno rumorosi, soprattutto durante il decollo e l'atterraggio. Questo è particolarmente vantaggioso negli aeroporti situati vicino a centri abitati.
  - Migliora la sostenibilità acustica e riduce l'impatto del rumore sulle comunità locali, facilitando l'accettazione sociale dell'aviazione.
- Flessibilità Operativa
  - La propulsione ibrida offre una maggiore flessibilità operativa, permettendo di operare in modalità elettrica per brevi tratte o per operazioni a bassa velocità (come taxiing a terra), riducendo il consumo di carburante e le emissioni anche in queste fasi.
  - Rende possibile l'utilizzo di velivoli ibridi in aeroporti regionali o piccoli, ottimizzando le operazioni a corto raggio e riducendo i costi di gestione.

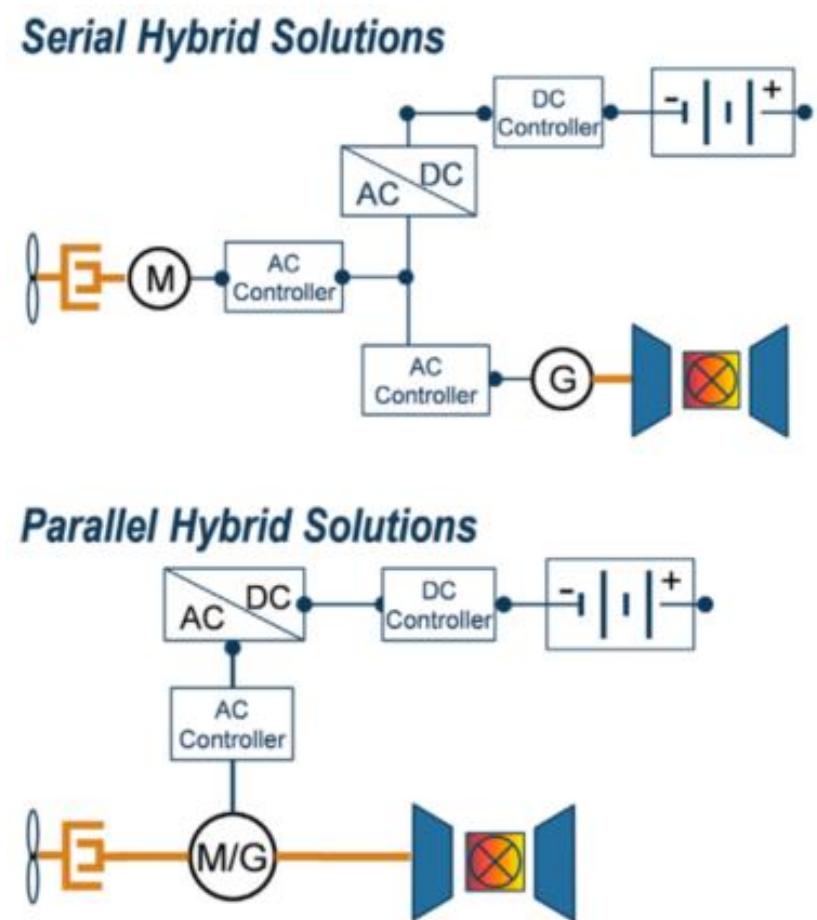
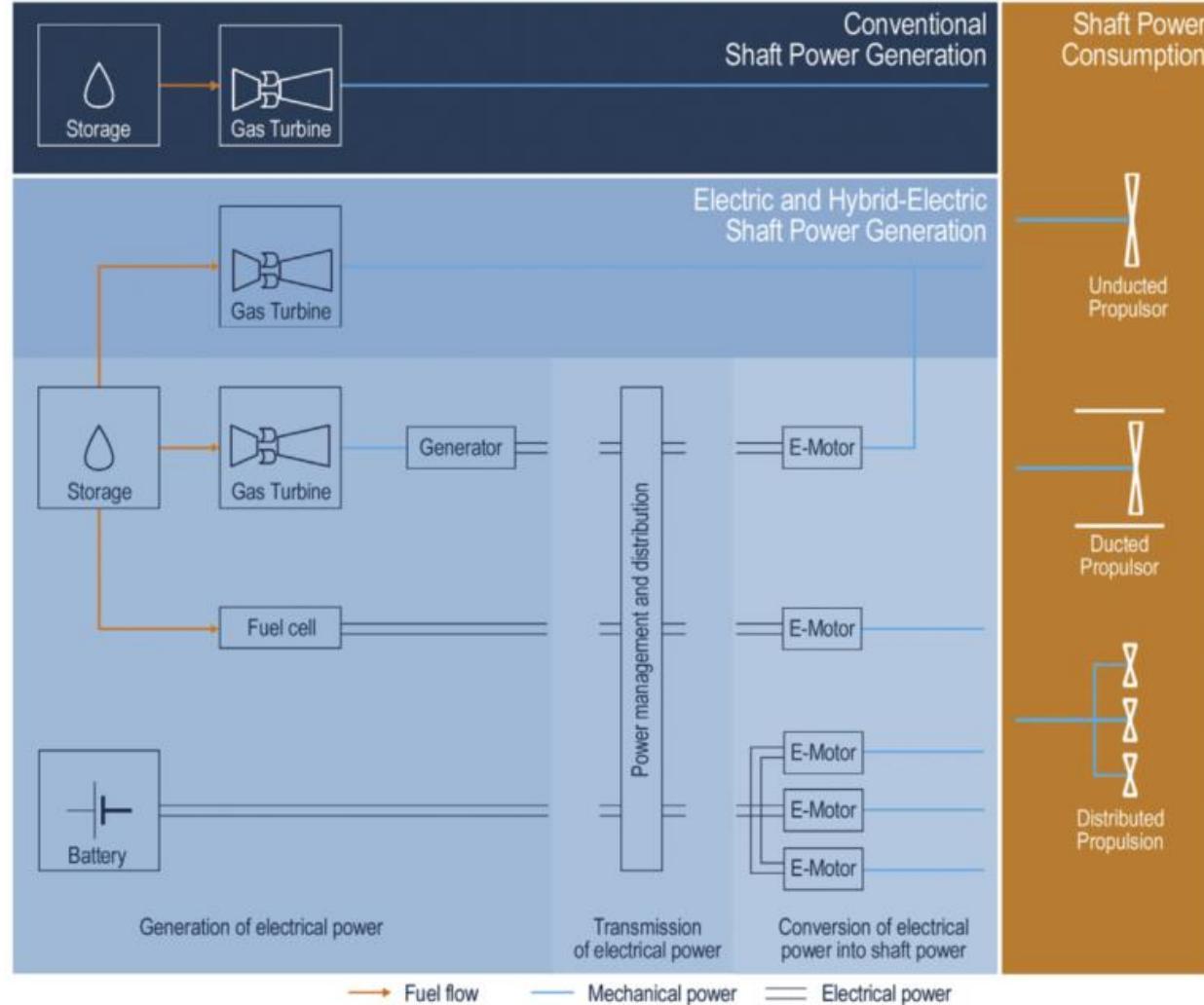
# PANORAMICA VELIVOLI IBRIDI



First Manned Electric Aircraft	1973: Militky MB-E1 
Experimental and Production Electric and Hybrid-Electric Aircraft	1998: AE-1 Silent 
	2009: ElectraFlyer-X 
	2009: Yuneec E430 
	2010: E-Flight Waiex 
	2010: S-HF Arcus-E 
	2011: Antares 23E 
	2011: Electrolight 2 
	2011: PC-A Elektra 1 
	2011: Electro G2 
	2011: Cessna 172(e) 
	2011: DA36 e-Star 
	2012: E-Fan 

**Fig. 5.** A survey of experimental, in-production or near in-production universally-electric aircraft sequenced according to year of first flight; first manned, fixed-wing electric flight shown at apex of chart; information compiled from [28,29].

# STRATEGIE DI IBRIDAZIONE



# STRATEGIE DI IBRIDAZIONE - SERIE



Nella configurazione ibrida in serie, il motore a combustione (di solito una turbina a gas) non è collegato direttamente all'elica. Funziona come un generatore che produce elettricità per caricare le batterie o alimentare i motori elettrici, che a loro volta forniscono la propulsione. Questo sistema consente al motore a combustione di operare a velocità costante, ottimizzando il consumo di carburante. Il vantaggio principale è l'efficienza energetica migliorata, soprattutto per i voli regionali, mentre la complessità aumenta per la gestione energetica e la dissipazione del calore.

## VANTAGGI

- Efficienza energetica: Il motore a combustione funziona principalmente come generatore, operando a velocità costante e in condizioni ottimali, con maggiore efficienza.
- Maggiore flessibilità operativa: I motori elettrici possono essere azionati autonomamente per decollo e salita, riducendo rumore ed emissioni.
- Semplicità meccanica: Non c'è connessione diretta tra motore a combustione e le eliche, quindi il design può essere più semplice in alcune configurazioni.

## SVANTAGGI

- Maggiore dipendenza dalle batterie: Richiede batterie più grandi e dense in energia per garantire una buona autonomia, aumentando il peso complessivo.
- Limitazioni di autonomia: La quantità di energia immagazzinata è limitata, quindi l'autonomia complessiva può essere inferiore rispetto ai sistemi convenzionali.
- Efficienza in crociera: In crociera, l'efficienza può risultare inferiore rispetto ad altri sistemi, poiché l'energia passa dal motore a combustione alle batterie e poi ai motori elettrici.

# STRATEGIE DI IBRIDAZIONE - PARALLELO



Nell'ibridazione in parallelo, sia il motore a combustione che i motori elettrici possono contribuire direttamente alla propulsione del velivolo. In fase di decollo e salita, i motori elettrici lavorano insieme al motore a combustione per fornire una spinta aggiuntiva, riducendo il consumo di carburante. In crociera, il motore a combustione può essere usato da solo, mentre i motori elettrici supportano la propulsione solo quando necessario. Questa configurazione offre flessibilità operativa e riduce i consumi nelle fasi di volo più esigenti, ma richiede un'integrazione complessa tra i due sistemi di propulsione.

## VANTAGGI

- **Efficienza di crociera:** Il motore a combustione può contribuire direttamente alla propulsione, ottimizzando i consumi in crociera, dove l'efficienza è più importante.
- **Flessibilità di potenza:** I motori elettrici possono supportare il decollo e la salita, riducendo il carico sui motori a combustione e migliorando la spinta totale quando necessario.
- **Minore dipendenza dalle batterie:** Poiché la potenza di spinta è distribuita tra i due sistemi, è possibile ridurre il peso delle batterie rispetto a un sistema in serie.

## SVANTAGGI

- **Sistemi meccanici complessi:** L'integrazione tra i motori elettrici e a combustione richiede un design meccanico e un sistema di gestione più sofisticati.
- **Pesi aggiuntivi:** La presenza di due sistemi di propulsione paralleli comporta un incremento complessivo di peso.
- **Efficienza energetica limitata:** Poiché entrambi i motori devono funzionare in alcune fasi, l'efficienza energetica complessiva può essere inferiore rispetto al sistema in serie.

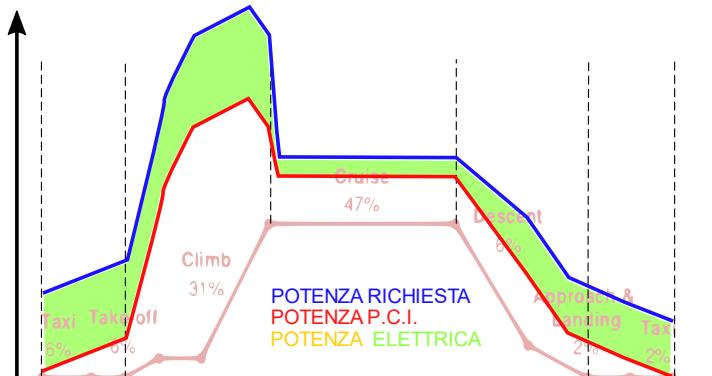
# STRATEGIE DI CONTROLLO



La ripartizione delle potenze utilizzate durante il volo porta a dimensionamenti differenti dei diversi sottosistemi

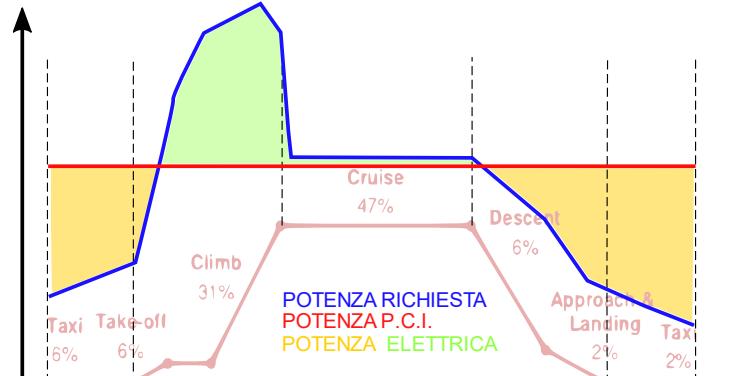
## SPLIT OPERATING MODE

Le diverse modalità di propulsione vengono usate in proporzione differente nelle diverse fasi di volo



## CONSTANT GAS TURBINE POWER OPERATING MODE

La turbina a gas lavora al regime di massima efficienza e il motore elettrico fornisce la potenza mancante (oppure ricarica la batteria) a seconda delle condizioni di volo.



# GRADO DI IBRIDAZIONE



Il grado di ibridazione in un velivolo rappresenta la proporzione di potenza fornita dal sistema elettrico rispetto alla potenza totale. Questo valore varia in base alla progettazione e all'obiettivo operativo del velivolo, e può andare da un basso grado di ibridazione (con un uso limitato dell'elettrico) fino a un alto grado di ibridazione (dove la propulsione elettrica ha un ruolo preponderante).

Un basso grado di ibridazione implica che il motore a combustione fornisce la maggior parte della spinta, e il sistema elettrico serve solo in fasi specifiche, come il decollo o la discesa.

Al contrario, un alto grado di ibridazione prevede una maggiore dipendenza dai motori elettrici, riducendo le emissioni e il consumo di carburante, ma richiede batterie più potenti e sistemi di gestione energetica avanzati. Il grado di ibridazione è quindi una scelta progettuale cruciale, che determina il peso delle batterie, la configurazione del sistema di propulsione e l'autonomia operativa del velivolo.

# GRADO DI IBRIDAZIONE



Il grado di ibridazione in un velivolo rappresenta la proporzione di potenza fornita dal sistema elettrico rispetto alla potenza totale. Questo valore varia in base alla progettazione e all'obiettivo operativo del velivolo, e può andare da un basso grado di ibridazione (con un uso limitato dell'elettrico) fino a un alto grado di ibridazione (dove la propulsione elettrica ha un ruolo preponderante).

Un basso grado di ibridazione implica che il motore a combustione fornisce la maggior parte della spinta, e il sistema elettrico serve solo in fasi specifiche, come il decollo o la discesa.

Al contrario, un alto grado di ibridazione prevede una maggiore dipendenza dai motori elettrici, riducendo le emissioni e il consumo di carburante, ma richiede batterie più potenti e sistemi di gestione energetica avanzati. Il grado di ibridazione è quindi una scelta progettuale cruciale, che determina il peso delle batterie, la configurazione del sistema di propulsione e l'autonomia operativa del velivolo.

# GRADO DI IBRIDAZIONE – BASSO



## Pro

- **Peso ridotto:** Comporta una quantità minima di batterie e componenti elettrici, riducendo l'impatto sul peso complessivo.
- **Minori costi di infrastruttura:** Richiede minore supporto per la ricarica e una minore complessità di manutenzione.
- **Economicamente vantaggioso:** Può risultare più conveniente, poiché i costi operativi e di manutenzione sono ridotti.

$$H_P = \frac{P_{ELEC}}{P_{TOT}} \text{ and } H_E = \frac{E_{ELEC}}{E_{TOT}}$$

## Contro

- **Effetti limitati sull'ambiente:** Contribuisce meno alla riduzione delle emissioni rispetto a sistemi ad alta elettrificazione.
- **Autonomia non ottimizzata:** Potrebbe non fornire sufficiente autonomia elettrica per operazioni silenziose o a basse emissioni nelle aree urbane.
- **Impatto ridotto sulle prestazioni:** La limitata potenza del sistema elettrico può ridurre i benefici per il decollo e la salita.

# GRADO DI IBRIDAZIONE - ALTO



## Pro

- **Massima riduzione delle emissioni:** Un alto grado di ibridazione consente di utilizzare il motore elettrico per la maggior parte delle operazioni, riducendo l'impatto ambientale.
- **Flessibilità operativa:** Permette una maggiore autonomia elettrica, con possibilità di voli a breve raggio completamente elettrici.
- **Riduzione del rumore:** I motori elettrici generano meno rumore, migliorando l'accettazione sociale in aree urbane o densamente popolate.

## Contro

- **Elevato peso delle batterie:** Richiede batterie grandi e dense, aumentando notevolmente il peso e riducendo l'efficienza complessiva.
- **Infrastruttura di ricarica costosa:** Necessità di sistemi di ricarica rapida e capillare negli aeroporti, con costi infrastrutturali rilevanti.
- **Maggiori costi di produzione e manutenzione:** Richiede componenti avanzati e aumenta la complessità della manutenzione.

# IMPATTI GRADO DI IBRIDAZIONE



## Architettura del Sistema di Propulsione

• **Basso Grado di Ibridazione:** Se il grado di ibridazione è basso, il motore a combustione continua a fornire la maggior parte della spinta. Il sistema elettrico funge da supporto, per esempio, durante il decollo o la salita, riducendo il carico sul motore principale.

- **Impatto:** Minore necessità di batterie e motori elettrici potenti; il sistema è relativamente più leggero e semplice.

• **Alto Grado di Ibridazione:** Quando il sistema elettrico assume una quota maggiore di potenza, diventa necessario un sistema di propulsione elettrico più robusto.

- **Impatto:** Richiede batterie di maggiore capacità, motori elettrici più potenti, e una struttura di supporto per sostenere l'aumento di peso e volume.

## Peso e Bilanciamento

• **Basso Grado di Ibridazione:** Il sistema elettrico ha un impatto minimo sul peso complessivo, poiché le batterie e i motori elettrici sono relativamente piccoli.

- **Impatto:** Mantenimento di un layout tradizionale, facilitando il bilanciamento del peso e l'aerodinamica.

• **Alto Grado di Ibridazione:** Un maggior grado di ibridazione comporta l'utilizzo di batterie e motori più grandi, con conseguente aumento di peso e necessità di riprogettare il layout.

- **Impatto:** Richiede modifiche strutturali per gestire la distribuzione del peso delle batterie, influenzando il centro di gravità e il bilanciamento aerodinamico.

# IMPATTI GRADO DI IBRIDAZIONE



## Gestione dell'Energia e Sistema di Controllo

• **Basso Grado di Ibridazione:** L'elettronica di gestione è relativamente semplice, poiché il sistema elettrico supporta solo alcune fasi di volo.

- **Impatto:** Controlli meno complessi per la gestione dell'energia, poiché il sistema elettrico funziona solo in alcune condizioni.

• **Alto Grado di Ibridazione:** È necessario un sistema di gestione energetica avanzato per garantire una transizione fluida tra i sistemi e ottimizzare l'uso dell'energia elettrica e a combustibile.

- **Impatto:** Necessità di un sistema di controllo più sofisticato, con algoritmi di gestione energetica che monitorano costantemente le fonti energetiche per garantire efficienza e sicurezza.

## Infrastruttura di Supporto e Ricarica

• **Basso Grado di Ibridazione:** Richiede meno energia elettrica per la ricarica, quindi l'infrastruttura di ricarica necessaria negli aeroporti può essere più semplice.

- **Impatto:** Minori costi e minore tempo per la ricarica, dato che la batteria è più piccola.

• **Alto Grado di Ibridazione:** La ricarica diventa un aspetto critico, specialmente per i voli a corto raggio che necessitano di frequenti decolli e atterraggi.

- **Impatto:** Necessità di una rete di ricarica veloce e potente per supportare le operazioni, con implicazioni sui costi operativi e sul tempo di gestione a terra.

# IMPATTI GRADO DI IBRIDAZIONE



## Autonomia e Profili di Missione

• **Basso Grado di Ibridazione:** Adatto a voli brevi in cui il motore a combustione fa la maggior parte del lavoro, mentre il sistema elettrico contribuisce durante i picchi di potenza.

- **Impatto:** Ideale per missioni con brevi decolli o operazioni urbane, con minime modifiche al design.

• **Alto Grado di Ibridazione:** Migliora l'autonomia a corto e medio raggio, permettendo al motore elettrico di gestire in autonomia alcune fasi del volo.

- **Impatto:** Richiede una progettazione orientata a ottimizzare il sistema elettrico per massimizzare il range, con una maggiore dipendenza dall'energia elettrica per coprire lunghe tratte.

## Efficienza Operativa e Costi di Manutenzione

• **Basso Grado di Ibridazione:** Manutenzione più vicina a quella dei velivoli tradizionali, con un sistema ibrido che incide poco sui costi e sulla complessità operativa.

- **Impatto:** Costi di manutenzione ridotti, poiché il sistema elettrico richiede meno interventi.

• **Alto Grado di Ibridazione:** Aumenta l'efficienza operativa in termini di consumi, ma comporta una manutenzione complessa per i sistemi elettrici.

- **Impatto:** Necessità di personale addestrato per gestire i sistemi ibridi e costi potenzialmente maggiori di gestione.

# GRADO DI IBRIDAZIONE POTENZA VS ENERGIA



## Grado di Ibridazione in Potenza

Rappresenta la frazione della potenza totale del velivolo che può essere fornita dal sistema elettrico rispetto alla potenza complessiva disponibile (sia elettrica che a combustione)

Un alto grado di ibridazione in potenza implica che il motore elettrico può fornire una quantità significativa di potenza durante le fasi di volo che richiedono molta energia, come il decollo o la salita. Questo permette di ridurre il carico sul motore a combustione e di abbattere il consumo di carburante in queste fasi.

Per un alto grado di ibridazione in potenza, il sistema elettrico deve essere dimensionato per generare potenza sufficiente in modo rapido e stabile, il che richiede motori elettrici potenti e batterie in grado di erogare alte correnti. Tuttavia, non implica necessariamente grandi riserve di energia.

## Grado di Ibridazione in Energia

Rappresenta la frazione dell'energia totale consumata durante una missione di volo che è fornita dal sistema elettrico rispetto all'energia complessiva richiesta.

Un alto grado di ibridazione in energia indica che il sistema elettrico contribuisce per una buona parte dell'energia totale utilizzata durante il volo, permettendo così di ridurre le emissioni e migliorare l'efficienza energetica complessiva.

Un alto grado di ibridazione in energia richiede batterie con una capacità elevata per fornire energia su periodi più lunghi. Questo può portare a un aumento del peso complessivo e richiede un compromesso tra autonomia, capacità di carico e prestazioni complessive del velivolo.

# SFIDE TECNOLOGICHE



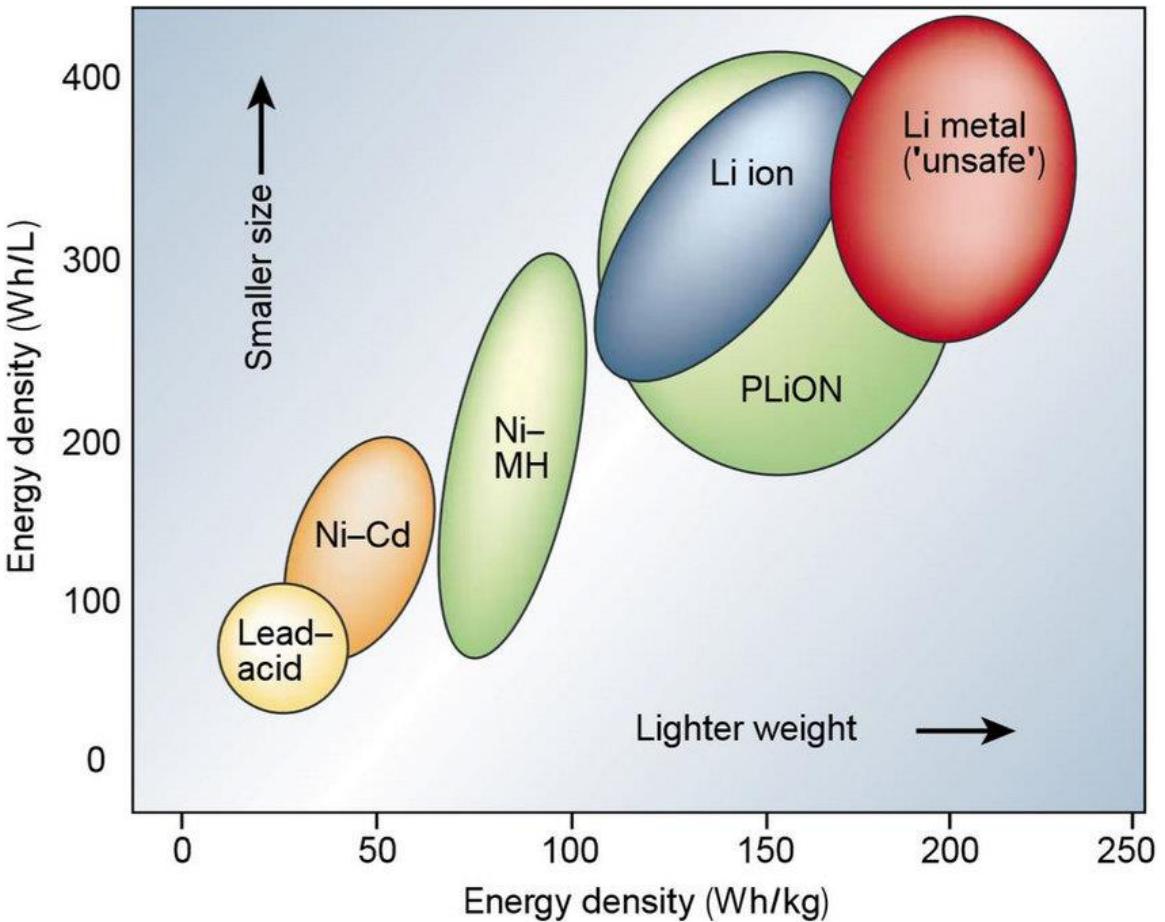
- 1. Densità Energetica delle Batterie** Le batterie attuali hanno una densità energetica inferiore ai combustibili fossili, quindi forniscono meno energia a parità di peso.
- 2. Gestione Termica delle Batterie e dei Sistemi Elettrici** I sistemi di accumulo energetico, come le batterie agli ioni di litio, generano molto calore, che deve essere dissipato per evitare malfunzionamenti o rischi di incendio.
- 3. Peso e Bilanciamento del Velivolo** L'aggiunta di batterie e motori elettrici aumenta significativamente il peso del velivolo e altera il bilanciamento aerodinamico.
- 4. Efficienza e Complessità del Sistema di Propulsione Ibrida** I sistemi ibridi combinano motori elettrici e a combustione, con una maggiore complessità nella gestione e nel controllo del sistema.
- 5. Limitata Autonomia Operativa** La capacità delle batterie attuali limita l'autonomia dei velivoli ibridi, rendendoli adatti principalmente a voli di corto e medio raggio.

# SFIDE TECNOLOGICHE



- 6. Infrastrutture di Supporto e Ricarica** Gli aeroporti e le strutture esistenti non sono attrezzati per supportare la ricarica rapida o la sostituzione di grandi pacchi batteria.
- 7. Costi di Sviluppo e Produzione Elevati** La progettazione e produzione di velivoli ibridi richiedono componenti avanzati e costosi, come batterie ad alta capacità e sistemi di gestione dell'energia.
- 8. Affidabilità e Sicurezza del Sistema Ibrido** I sistemi ibridi richiedono una gestione coordinata e una sincronizzazione costante tra i motori elettrici e a combustione, aumentando la complessità del sistema.
- 9. Sviluppo di Normative e Certificazioni** L'industria aeronautica segue rigidi standard di sicurezza e le normative per i velivoli ibridi non sono ancora ben definite.
- 10. Integrazione dell'Energia Rinnovabile e Impatto Ambientale** Integrare fonti di energia rinnovabile, come l'energia solare o l'idrogeno, per alimentare le batterie e ridurre ulteriormente l'impatto ambientale.

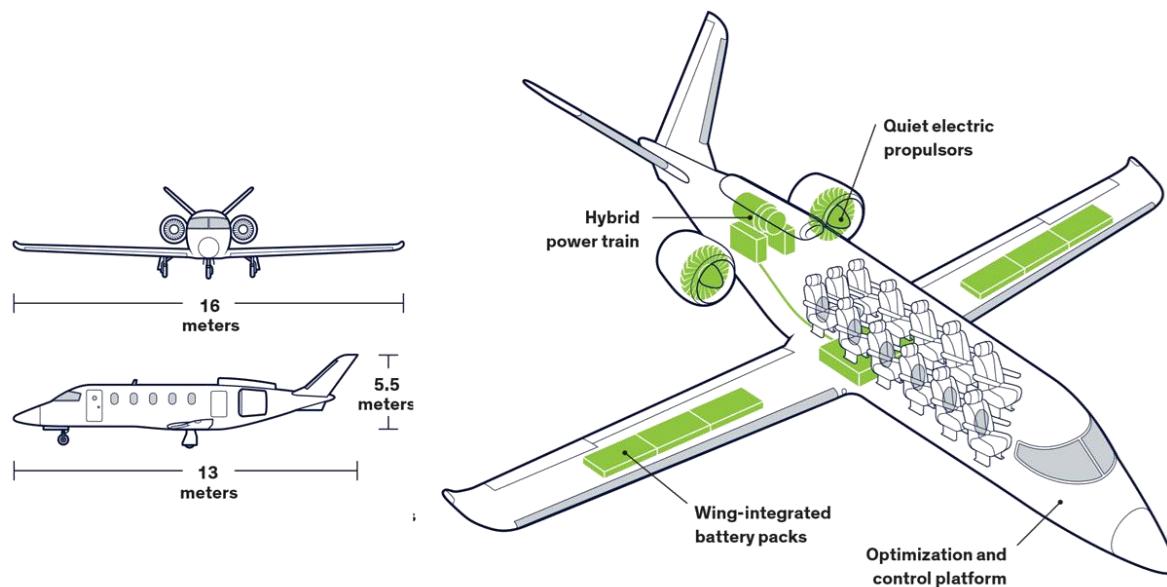
# PESI E VOLUMI



**Table 1**

Overview of propulsion components and technology performance assumptions.

Component	Mass sizing parameter	Efficiency [%]	Source
Battery	1000–1500 Wh/kg	85.0–95.0	Stückl et al. [46] Kuhn et al. [51]
HTS-Motor	20.0 kW/kg	99.5	Brown [52]
Controller	20.0 kW/kg	99.5	Brown [52]
Converter	18.0 kW/kg	99.5	Brown [52]
HTS Cable	9.2 kg/m	~100	Xin [53]
SSPC	44.0 kW/kg	99.5	Brown [52]



# AFFIDABILITA'

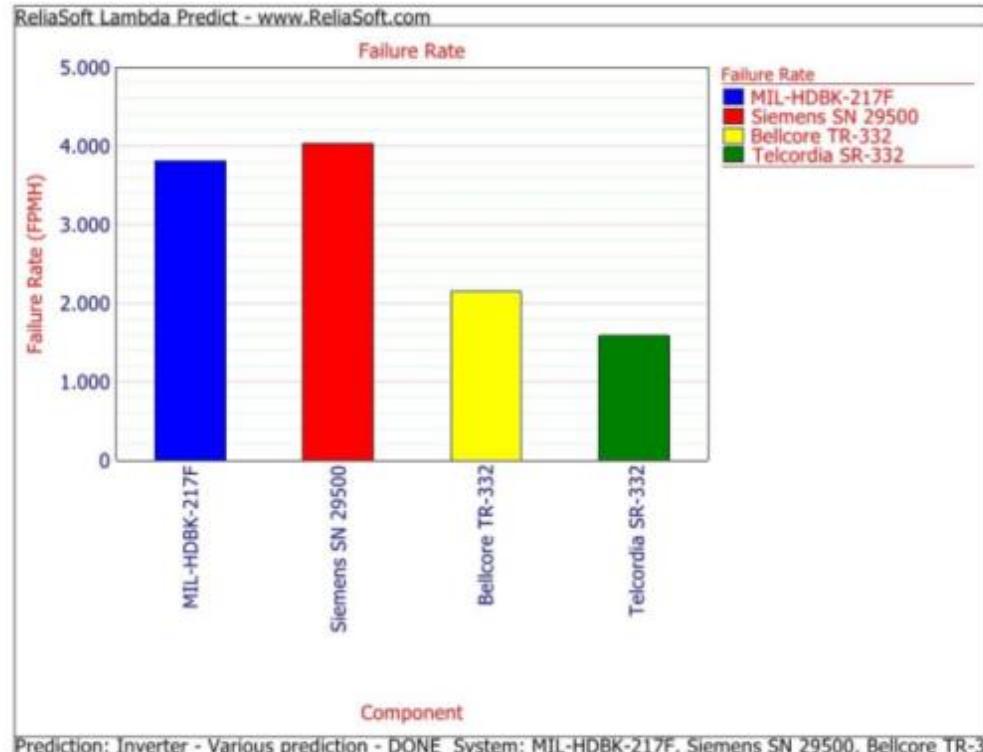


Figure 20: Inverter - Failure rate comparison between different reliability prediction standards

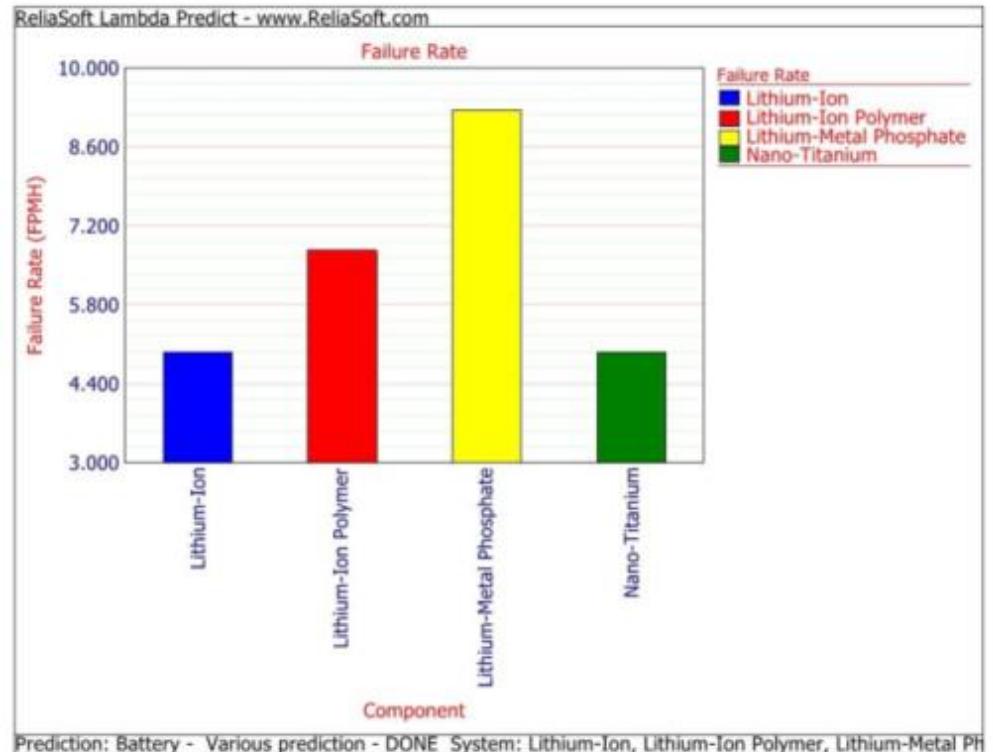


Figure 26: Battery - Failure rate (960 cells)

FPMH degli attuali motori aeronautici è circa 3

\*FPMH – Failure Per Million Hours

# PROFILI DI MISSIONE

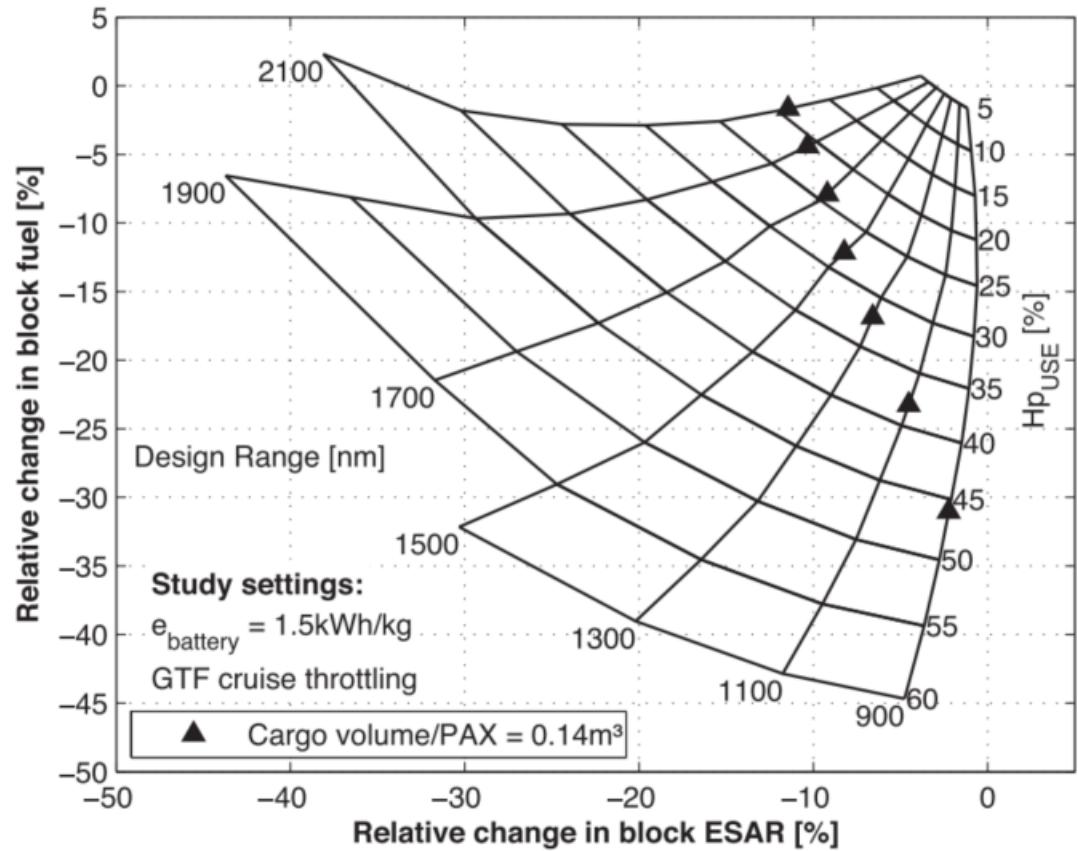
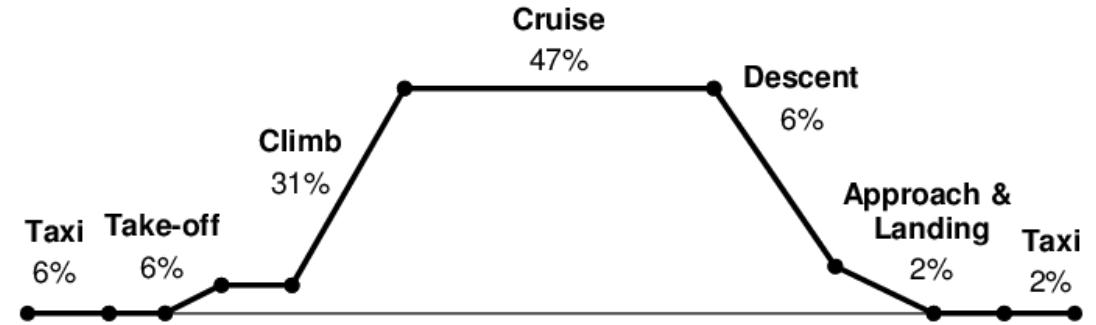


Fig. 12. Relative change in block fuel versus relative change in block ESAR.



Se consideriamo un grado di ibridazione pari a 40% in potenza:

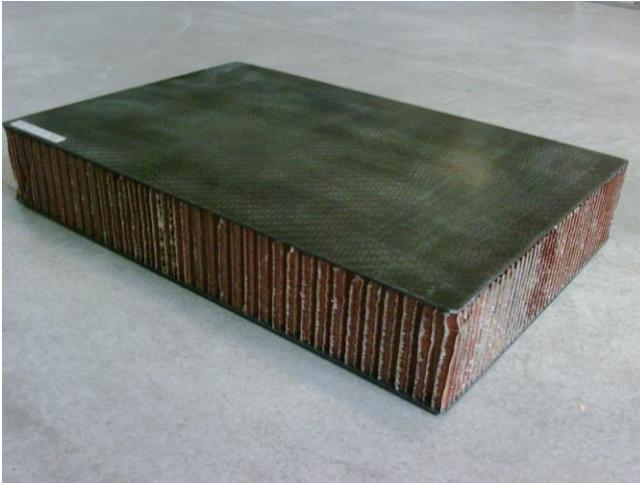
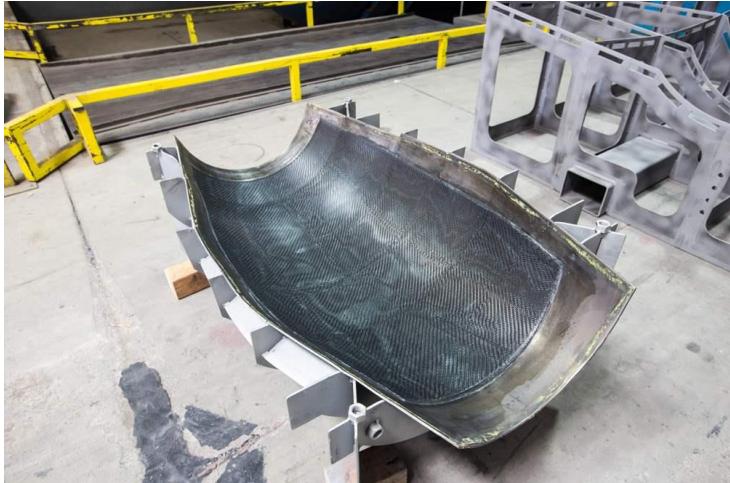
- 25% di carburante per un range di 1100nm
- 10% carburante per range di 1900nm

**La propulsione ibrida si rivela vantaggiosa per tratte regionali.**

# STRUTTURE



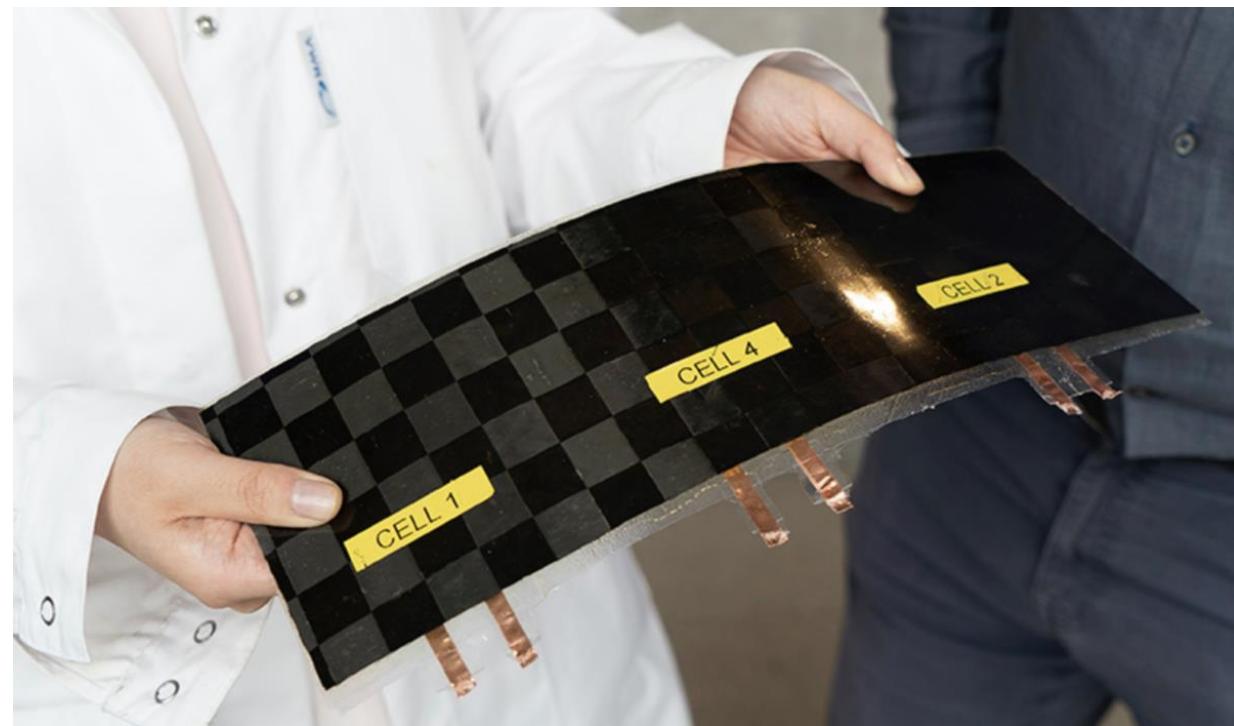
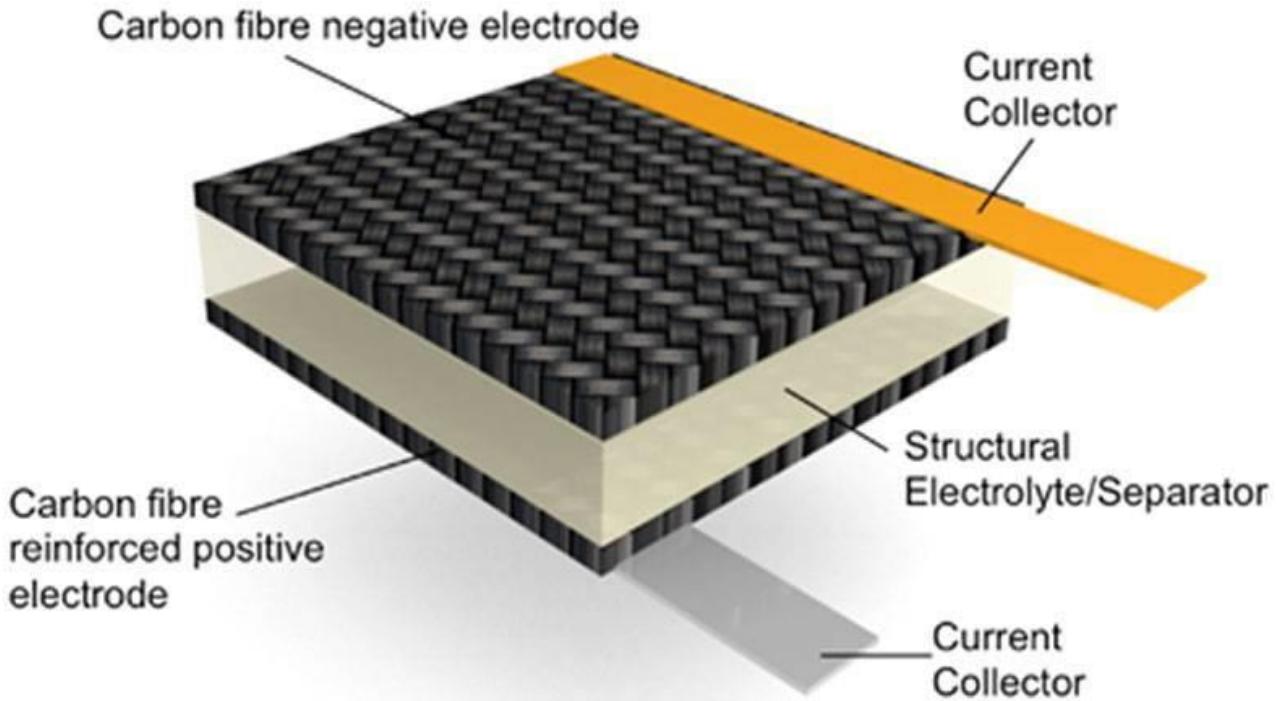
Il requisito della leggerezza, di primaria importanza nel settore aerospaziale, diventa cruciale nello sviluppo di aerei ibridi. L'utilizzo di materiali leggeri, quali la fibra di carbonio o strutture sandwich può compensare l'aumento della massa dovuto al propulsore elettrico e i relativi sistemi di gestione e accumulo di energia.



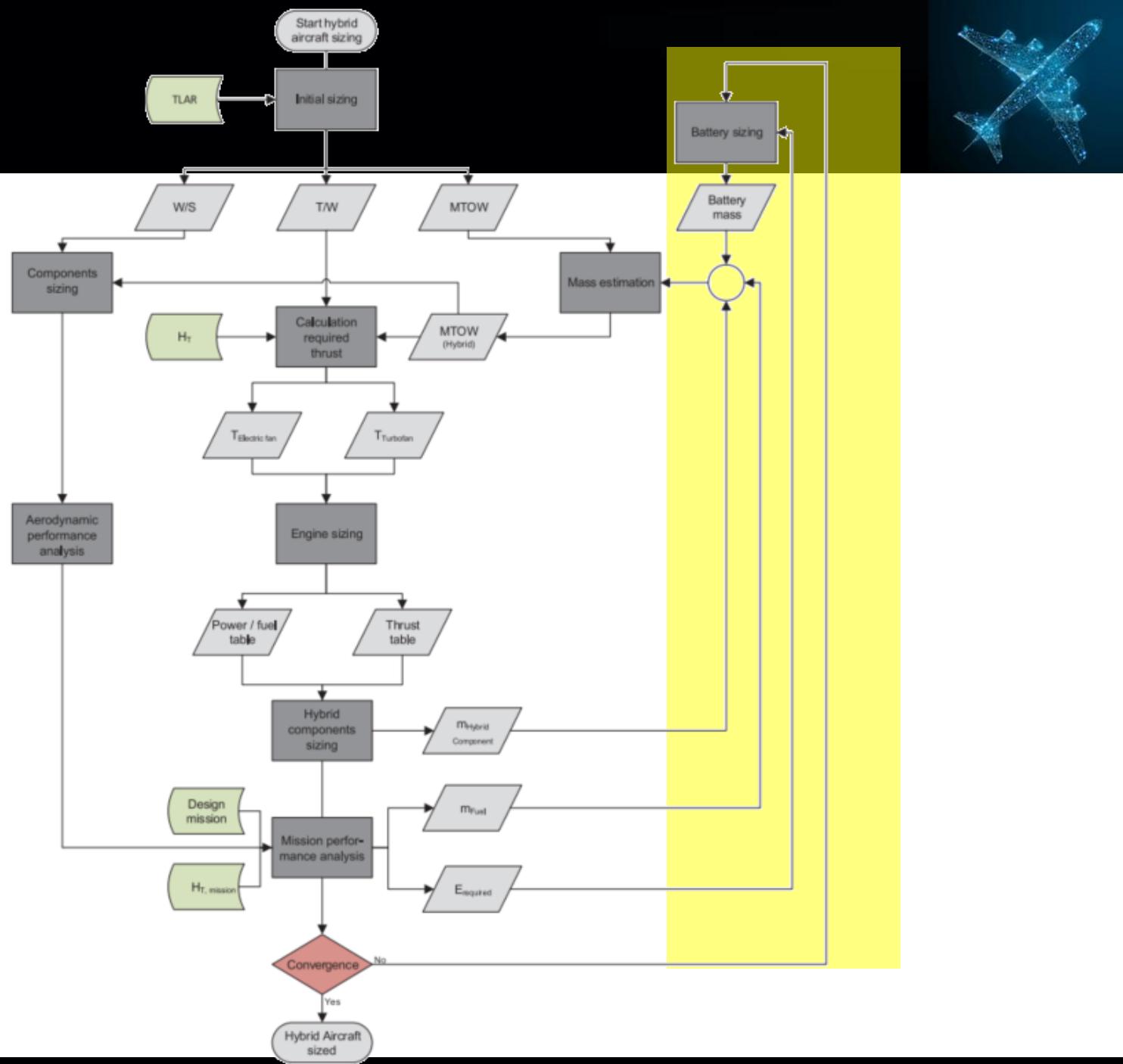
# BATTERIE STRUTTURALI



Le batterie strutturali sono dispositivi che combinano funzioni strutturali e di accumulo energetico, integrando componenti elettrici direttamente nella struttura di veicoli o dispositivi. Questo consente di risparmiare peso e spazio, aumentando l'efficienza e la durata dei prodotti, specialmente in ambiti come l'industria aerospaziale e automobilistica. Attualmente, la ricerca si concentra sull'ottimizzazione dei materiali compositi per migliorare capacità energetica e resistenza meccanica.



# ESEMPIO DI PROCEDURA PER IL DIMENSIONAMENTO VELIVOLO IBRIDO



# CASE STUDY

Max cruise speed	340 mph
Max range	700+ miles
Max altitude	25,000 ft
Runway with 50 ft obstacle	2,200 ft
Landing distance with 50 ft obstacle	2,500 ft
Rate of climb	1,600 ft per minute
Time to climb sea level to FL 25	18 minutes
Stall speed	73 KIAS
Seating capacity	12 economy, 9 premium, 6 executive
Operating cost	8¢ per seat mile, \$250 per hour
Max take-off weight	11,500 lbs
Max payload	2,500 lbs
Usable fuel	800 lbs
Architecture	Series hybrid with range extender
Max power	1 MW variants
Battery mass	Under 20% of max take-off weight
Turbogenerator	500 kW variants
Emissions	0.0 to 0.3 lbs CO2/ASM
Sideline noise	65 EPNdB

## Zunum planning fleet of hybrid-electric planes

Seattle-based startup Zunum Aero, backed by aviation giants Boeing and JetBlue, is aiming to reshape regional air travel with its ZA10 – the first in a series of planned hybrid-electric commuter aircraft

### ZUNUM AERO ZA10

#### Cockpit

One or two pilots




Orders: JetSuite to buy up to 100 aircraft

**Cabin:** Seating for 12 passengers in economy class configuration, or nine premium, or six executive

**Operating costs:** Zunum targeting \$250 per hour – 60-80 percent lower than comparable conventional aircraft

#### PROPELLION SYSTEM

**Integrated control platform**  
Determines optimal energy usage plan for each flight and manages battery power

**Battery packs:** Can be quickly swapped out at airports instead of waiting to be recharged



#### ZA10 SPECIFICATIONS

Length	12.8m
--------	-------

Wingspan	15.9m
----------	-------

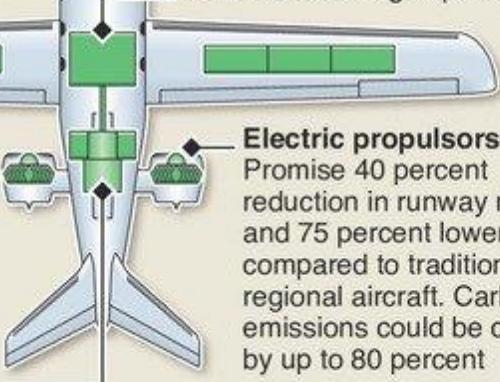
Max cruise	547km/h
------------	---------

Range	More than 1,127km
-------	-------------------

Altitude	7,620m
----------	--------

**Fuel tank:** 363kg capacity

**Hybrid powertrain**  
*Safran Ardiden 3Z* turbine engine powers integrated turbo-generator, delivering 500kW of electrical power to supplement battery packs during key stages of flight and over long ranges



**Electric propulsors**  
Promise 40 percent reduction in runway needs and 75 percent lower noise compared to traditional regional aircraft. Carbon emissions could be cut by up to 80 percent

# CASE STUDY



## Panoramica del Progetto

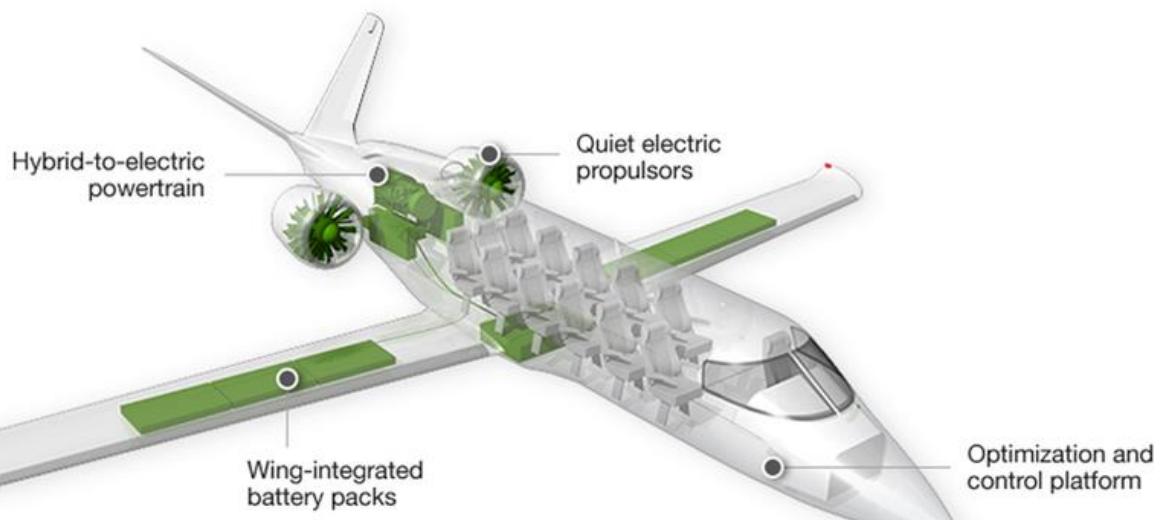
- **Obiettivo:** Creare un aeroplano ibrido per tratte regionali, ottimizzato per ridurre costi operativi, consumi di carburante ed emissioni di CO<sub>2</sub>, specialmente per distanze fino a 1.000 km.
- **Tipo di propulsione:** Ibrido in parallelo, combinando un motore a combustione (turbina a gas) e motori elettrici alimentati da batterie.
- **Capacità:** 12 passeggeri, destinato a operazioni a corto raggio tra città o aeroporti regionali, ideali per collegamenti con alta frequenza.

## Design e Architettura del Sistema di Propulsione

- **Motore a combustione:** Il velivolo è dotato di una turbina a gas ottimizzata per operare in crociera e per generare elettricità da destinare alle batterie.
- **Motori elettrici:** Alimentati da batterie, i motori elettrici sono progettati per supportare il decollo e la salita, riducendo il carico sulla turbina e migliorando l'efficienza complessiva.
- **Batterie:** Il velivolo usa batterie agli ioni di litio con una densità energetica relativamente alta, progettate per essere aggiornate mano che la tecnologia delle batterie evolve.



# CASE STUDY



## Strategie di Ibridazione

- **Ibridazione in parallelo:** Permette alla turbina a gas di fornire potenza direttamente alla propulsione, ma con il supporto dei motori elettrici durante fasi ad alta richiesta di potenza (es. decollo e salita).
- **Funzionamento in modalità solo elettrica:** Il ZA10 può operare in modalità completamente elettrica per brevi distanze, riducendo al minimo le emissioni di gas a effetto serra e il rumore nelle vicinanze degli aeroporti.

## Benefici del Design Ibrido

- **Riduzione dei costi operativi:** Il sistema di propulsione ibrido permette una significativa riduzione dei costi di carburante e una riduzione complessiva del costo per posto/chilometro fino al 40%.
- **Emissioni ridotte:** Il design mira a ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub> fino all'80% rispetto ai velivoli tradizionali, grazie all'uso dell'elettricità durante le fasi più inquinanti.
- **Minore inquinamento acustico:** I motori elettrici consentono un decollo più silenzioso, migliorando la sostenibilità acustica del velivolo, specialmente per aeroporti urbani o a densità abitativa elevata.

# CASE STUDY



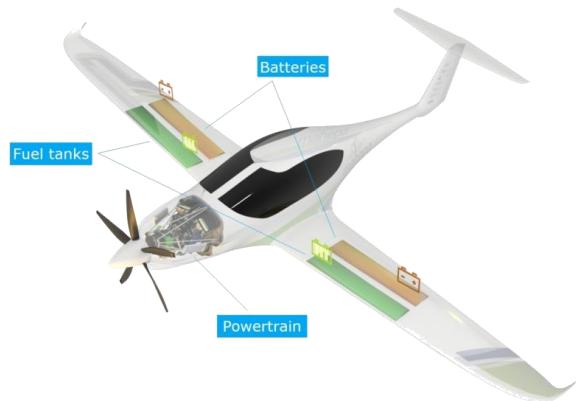
## Sfide Tecniche e Limiti

- Peso delle batterie:** La tecnologia attuale delle batterie ha limitato l'autonomia del ZA10, limitando il volo completamente elettrico a tratte molto brevi.
- Ricarica e infrastruttura:** La necessità di un'infrastruttura di ricarica rapida negli aeroporti regionali rappresenta una sfida significativa in termini di costi e tempi di attuazione.
- Manutenzione e complessità operativa:** La combinazione di sistemi elettrici e a combustione ha richiesto nuovi standard di manutenzione e personale addestrato per gestire un sistema di propulsione ibrido

## Analisi delle Performance

- Autonomia:** Fino a 1.600 km in modalità ibrida, con autonomia ridotta a meno di 100 km in modalità completamente elettrica.
- Velocità di crociera:** 550 km/h, simile a quella di altri velivoli regionali a corto raggio.
- Tempo di ricarica:** Necessità di tempi di ricarica significativi per tratte multiple, limitando la flessibilità delle operazioni giornaliere.

# PROGRAMMI DI RICERCA



Modular Approach  
to Hybrid Electric  
Propulsion Architecture

<https://mahepa.eu/>



<https://www.nasa.gov/aeroresearch/X-57/technical/index.html.aero/>

<https://zunum.aero/>

<https://zunum.aero/>

# RIFERIMENTI



- [1] C. Pernet, A.T. Isikveren, Conceptual design of hybrid-electric transport aircraft, Progress in Aerospace Sciences, Volume 79, 2015, Pages 114-135, DOI: 10.1016/j.paerosci.2015.09.002.
- [2] D1.1: Concept of Modular Architecture for Hybrid Electric Propulsion of Aircraft  
<https://mahepa.eu/wp-content/uploads/2017/12/D1.1-Concept-of-Modular-Architecture-fro-Hybrid-Electric-Propulsion-of-Aircraft.pdf>
- [3] Martin Hepperle, Electric Flight – Potential and Limitations, German Aerospace Center  
<https://nag.aero/wp-content/uploads/2018/05/MP-AVT-209-09-Electric-Flight-Potential-and-Limitations.pdf>
- [4] DESIGN OF A HYBRID ELECTRIC PROUPULSION SYSTEM WITHIN A PRELIMINARY AIRCRAFT DESIGN SOFTWARE ENVIRONMENT B. Aigner, M. Nollmann, E. Stumpf Institute of Aerospace Systems, RWTH Aachen University Wüllnerstr. 7, 52062 Aachen  
<https://publications.rwth-aachen.de/record/749147/files/749147.pdf>