

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

***Relazione per la prova finale
«L'utilizzo dell'idrogeno nell'industria
aerospaziale: Airbus e il progetto
ZEROe»***

Tutor universitario: Prof. Roberta Bertani

Laureando: *Gianluca Scudier 1221097*

Padova, 18/07/2023

L'idrogeno è stato utilizzato con sicurezza nell'industria aerospaziale e automobilistica per decenni. La sfida dell'industria aeronautica ora è prendere questo vettore energetico decarbonizzato e adattarlo alle esigenze dell'aviazione commerciale. Ad oggi l'industria aeronautica rappresenta oltre il 2% delle emissioni globali di CO_2 provocate dall'uomo, si stima tuttavia che l'idrogeno abbia il potenziale per ridurre le emissioni di CO_2 del trasporto aereo fino al 50%.

L'idrogeno è una tecnologia ad alto potenziale con un'energia specifica per unità di massa tre volte superiore rispetto al tradizionale carburante per aerei. Se generato da energia rinnovabile attraverso l'elettrolisi, l'idrogeno non emette emissioni di CO_2 , consentendo così all'energia rinnovabile di alimentare potenzialmente grandi aeromobili su lunghe distanze ma senza l'indesiderabile sottoprodotto delle emissioni di CO_2 .

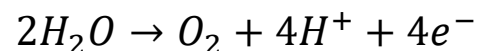
L'ambizione di Airbus è dunque sviluppare il primo velivolo commerciale alimentato a idrogeno al mondo entro il 2035, attraverso il progetto di ricerca e sviluppo ZEROe. Tutti e tre i concepts ZEROe sono aerei ibridi a idrogeno.

Nel 2022 è stato lanciato da Airbus il dimostratore ZEROe con l'obiettivo di testare la tecnologia di combustione dell'idrogeno su una piattaforma multimodale A380. Attraverso futuri test a terra e in volo, si prevede di raggiungere un livello di prontezza tecnologica matura per un sistema di propulsione a combustione di idrogeno entro il 2025.

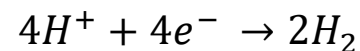


L'elettrolisi è il processo con il quale si promuove una reazione nel verso non spontaneo con l'ausilio della corrente elettrica, in particolare l'elettrolisi dell'acqua è il processo elettrolitico nel quale il passaggio di corrente elettrica causa la scomposizione dell'acqua in ossigeno ed idrogeno gassoso. Nel caso in esame la cella elettrolitica è in genere composta da due elettrodi di un metallo inerte (ad esempio platino), immersi in una soluzione elettrolitica (ad esempio idrossido di potassio KOH) e connessi ad una sorgente di corrente (ad esempio una batteria da 6 volt). L'ossidazione avviene all'anodo e la riduzione avviene al catodo, i cationi migrano attraverso l'elettrolito verso il catodo e gli anioni verso l'anodo. La corrente deve essere fornita da una sorgente esterna ed essa spinge gli elettroni lungo il circuito metallico in un verso prestabilito, con il risultato di forzare l'ossidazione ad un elettrodo e la riduzione nell'altro. La corrente elettrica dissocia la molecola d'acqua negli ioni H^+ e OH^- .

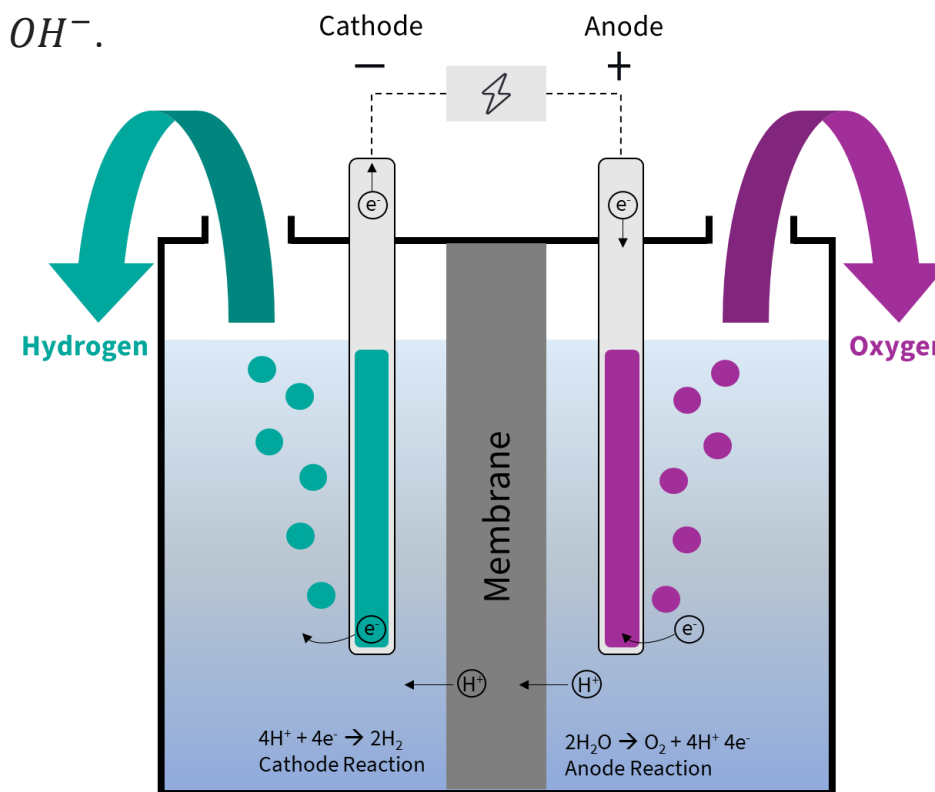
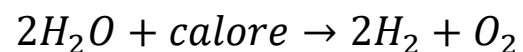
All'anodo avviene dunque la seguente reazione:



Al catodo gli ioni idrogeno (H^+) acquistano elettroni in una reazione di riduzione che porta alla formazione di idrogeno gassoso:



La reazione di ossido-riduzione completa è allora:



Ci sono due modi in cui l'idrogeno può essere utilizzato come fonte di energia per la propulsione degli aerei. In primo luogo tramite la combustione dell'idrogeno in una turbina a gas, in secondo luogo utilizzando celle a combustibile per convertire l'idrogeno in elettricità per alimentare un motore a elica. Una turbina a idrogeno può anche essere accoppiata con celle a combustibile invece che con batterie in un'architettura ibrida-elettrica.

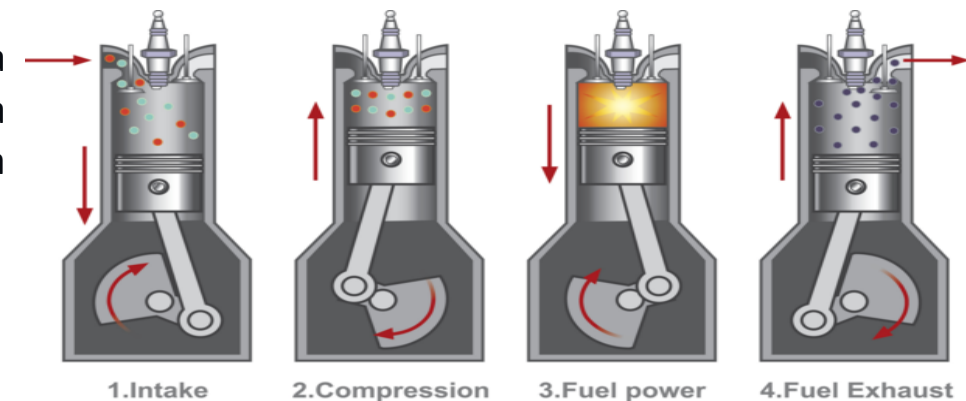
La combustione è un processo chimico che comporta il rilascio di energia da una miscela di carburante e aria. Nel caso della combustione dell'idrogeno, l'idrogeno liquido o gassoso viene bruciato in un motore a turbina a gas modificato per generare spinta. Questo processo è identico alla combustione interna tradizionale, tranne per il fatto che l'idrogeno sostituisce la sua controparte fossile.

Costituito da un cilindro fisso e da uno o più pistoni mobili, un motore ad accensione comandata funziona nel seguente modo:

- Durante il processo di aspirazione, il carburante viene miscelato con l'aria e introdotto nel cilindro.
- Il pistone quindi comprime la miscela aria-carburante, che viene accesa da una scintilla. L'accensione provoca la combustione.
- I gas di combustione in espansione azionano il pistone, che fa ruotare l'albero motore fornendo la potenza necessaria.

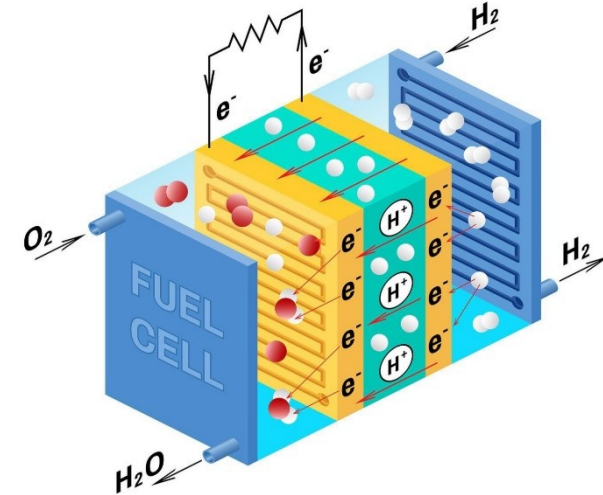
L'idrogeno ha molte proprietà uniche che lo rendono adatto alla combustione, tra cui:

- Ampio intervallo di infiammabilità: l'idrogeno può essere bruciato tramite un'ampia gamma di miscele aria-carburante. Infatti, l'idrogeno può funzionare con una miscela "magra", il che significa che la quantità di carburante è inferiore a quella necessaria per la combustione con una data quantità di aria.
- Elevata temperatura di autoaccensione: l'elevata temperatura di autoaccensione dell'idrogeno consente rapporti di compressione più elevati in un motore a idrogeno rispetto a un motore a idrocarburi. Un rapporto di compressione più elevato si traduce in una maggiore efficienza termica o in una minore perdita di energia durante la combustione.



Una cella a combustibile è un dispositivo che converte l'energia immagazzinata nelle molecole in elettricità attraverso una reazione elettrochimica. Composta da due elettrodi (un anodo e un catodo) separati da una membrana elettrolitica, una tipica cella a combustibile a idrogeno funziona nel seguente modo:

- L'idrogeno entra nella cella a combustibile attraverso l'anodo. Qui, gli atomi di idrogeno reagiscono con un catalizzatore e si dividono in elettroni e protoni. L'ossigeno dall'aria ambiente entra dall'altra parte attraverso il catodo.
- I protoni caricati positivamente passano attraverso la membrana elettrolitica porosa fino al catodo. Gli elettroni caricati negativamente fuoriescono dalla cella e generano una corrente elettrica, che può essere utilizzata, ad esempio, per alimentare un sistema di propulsione elettrico o ibrido-elettrico.
- Nel catodo, i protoni e l'ossigeno si combinano quindi per produrre acqua.



Poiché le celle a combustibile generano elettricità attraverso una reazione elettrochimica, sono una fonte di energia pulita. Infatti, le celle a combustibile che utilizzano idrogeno puro sono prive di carbonio. Altri vantaggi chiave delle celle a combustibile includono:

- Le singole celle a combustibile possono essere "impilate" per formare sistemi più grandi in grado di produrre più energia, consentendo così la scalabilità. Una singola cella a combustibile può produrre una tensione sufficiente per alimentare piccole applicazioni, mentre pile di celle a combustibile possono essere combinate per creare installazioni multi-megawatt su larga scala.
- A differenza delle batterie che devono essere ricaricate, le celle a combustibile possono continuare a generare elettricità fintanto che viene fornita una fonte di combustibile (idrogeno).

Si prevede che il concept ZEROe di Airbus utilizzerà celle a combustibile a idrogeno per creare energia elettrica che integri i motori a turbina a gas modificati, risultando in un sistema di propulsione ibrido-elettrico altamente efficiente.

Tutti e tre i concepts ZEROe sono aerei ibridi a idrogeno e possono essere classificati come:

- Concept Blended-Wing Body;
- Concept Turbofan;
- Concept Turboprop.

Sono alimentati dalla combustione dell'idrogeno attraverso motori a turbina a gas modificati. L'idrogeno liquido viene utilizzato come combustibile per la combustione con l'ossigeno.

Inoltre, le celle a combustibile a idrogeno creano energia elettrica che integra la turbina a gas, dando vita a un sistema di propulsione ibrido-elettrico altamente efficiente. Tutte queste tecnologie sono complementari e i vantaggi si sommano.

IL PRIMO CONCEPT: BLENDED-WING BODY

Blended-Wing Body (BWB): Come l'aereo turbofan, due motori turbofan ibridi a idrogeno forniscono la spinta.

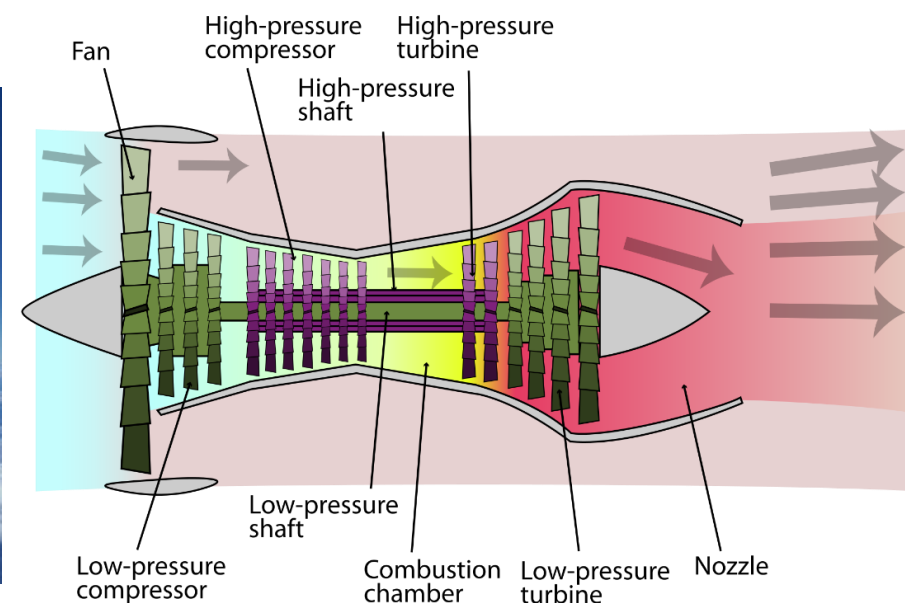
Nel concept di design "blended-wing body", che permette il trasporto fino ad un numero massimo di 200 passeggeri, le ali si fondono con il corpo principale dell'aeromobile.

Questa configurazione presenta una fusoliera eccezionalmente ampia, aprendo così molteplici opzioni per lo stoccaggio e la distribuzione dell'idrogeno, oltre che per il layout della cabina. In questo esempio, i serbatoi di stoccaggio dell'idrogeno liquido sono immagazzinati sotto le ali.



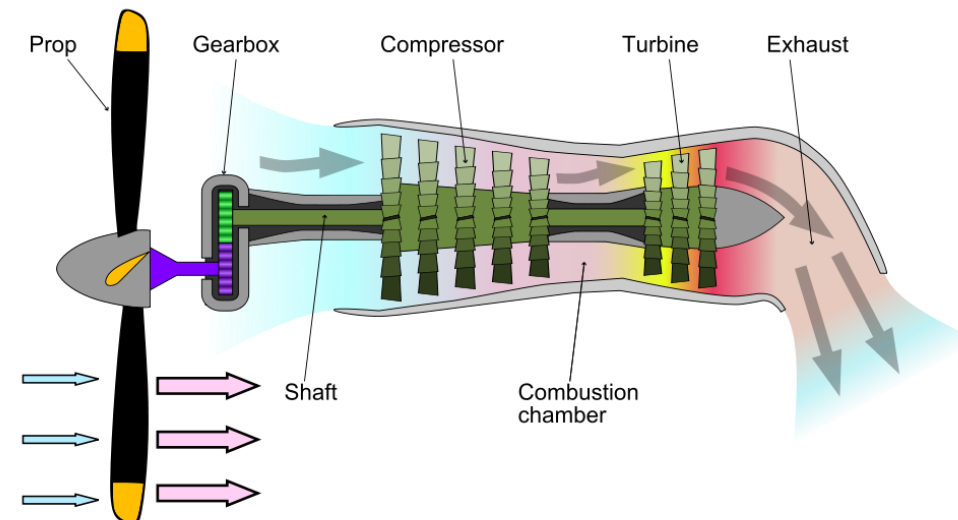
Il propulsore turbofan consiste in un turboreattore con l'aggiunta di un ventilatore (Fan), solitamente di diametro assai maggiore di quello medio dello stesso turboreattore, disposto immediatamente a monte del compressore. Secondo questa configurazione la portata d'aria passa attraverso un condotto di aspirazione, o presa dinamica, il cui compito è quello di addurre la corrente d'aria al compressore nel modo più efficiente possibile dal punto di vista aerodinamico. Successivamente una parte della portata d'aria che attraversa il ventilatore entra nel turboreattore, mentre la restante parte non è oggetto di successive trasformazioni termodinamiche e semplicemente lambisce l'involucro esterno del propulsore caldo, dal quale peraltro è termicamente isolata. Entrata nel turboreattore la portata viene compressa fino ad una certa pressione dal compressore. Il fluido compresso viene in seguito convogliato all'interno di una camera di combustione ove si miscela col combustibile, la miscela così formata brucia e subisce un forte aumento di temperatura, mentre la pressione non varia in modo apprezzabile. I gas combusti sono poi fatti espandere in turbina, la quale produce una potenza meccanica necessaria e sufficiente a trascinare il compressore. Infine l'ugello ha la funzione di convertire l'energia dei gas scaricati dalla turbina (sottoforma di entalpia totale) in energia cinetica che è fautrice della spinta propulsiva.

In questo concept due motori turbofan ibridi a idrogeno forniscono la spinta. Il progetto permetterà il trasporto di un minimo di 120 passeggeri fino ad un massimo di 200 ed un'autonomia di oltre 2.000 miglia nautiche. Sarà dunque in grado di operare in modo transcontinentale. L'idrogeno liquido sarà immagazzinato e distribuito tramite serbatoi situati dietro la paratia di pressione posteriore.



A differenza del propulsore visto precedentemente, il turboelica (turboelica) è un dispositivo ova la spinta viene creata in massima parte grazie all'azione propulsiva di un'elica, il cui moto rotatorio è generato da una turbina a gas, ossia un generatore di gas (compressore, combustore, turbina), in cui però l'espansione in turbina serve a trascinare sia il compressore sia la stessa elica. In questo modo l'espansione dei gas combusti nell'ugello a valle della turbina fornisce una quota parte di spinta, spesso irrisoria rispetto a quella prodotta dall'elica, che risulta perciò il vero apparato propulsivo. In altre parole, il fluido elaborato dal generatore di gas non si può considerare in questo caso direttamente fautore della spinta, essendo quest'ultima prodotta da un propulsore sostanzialmente separato (l'elica), rispetto al gruppo generatore di gas, che funge di fatto da motore primo.

Il progetto turboelica, che fornisce la possibilità di trasportare fino a 100 passeggeri, utilizza un motore turboelica, invece di un turboventola, ed è alimentato anche dalla combustione di idrogeno in motori a turbina a gas modificati. Di conseguenza due motori turboelica ibridi ad idrogeno azionano le eliche a otto pale, fornendo la spinta necessaria a percorrere più di 1.000 miglia nautiche, rendendolo un'opzione perfetta per brevi viaggi di trasporto. Simile al velivolo turbofan, il sistema di stoccaggio e distribuzione dell'idrogeno liquido si trova dietro la paratia di pressione posteriore.



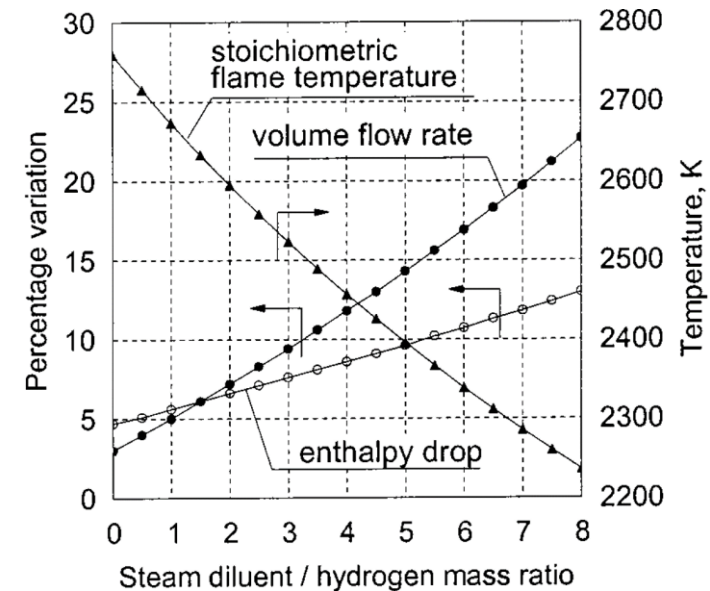
Gli effetti più rilevanti causati dalla combustione dell'idrogeno, al posto del gas naturale, che ricadono sulle azioni della turbina a gas sono:

- una variazione della caduta di entalpia nell'espansione;
- una variazione della portata all'entrata della turbina che influenza l'accoppiamento turbina/compressore;
- una variazione del coefficiente di scambio termico sul lato esterno delle pale della turbina, che influenza la performance del sistema di raffreddamento.

CADUTA DI ENTALPIA

La figura mostra l'influenza della combustione dell'idrogeno (in presenza di un flusso variabile di vapore diluente) sulla caduta isoentropica di entalpia di una turbina per date condizioni in ingresso ($T = 1450 \text{ °C}$ e $p = 17 \text{ bar}$) e pressione atmosferica all'uscita. Comparato al caso di gas naturale, la combustione di semplice idrogeno incrementa la caduta di entalpia di circa un 5%, variazione che aumenta man mano che aumenta la aggiunta di vapore. Assumendo il comportamento del fluido operativo come quello di un gas ideale, dal momento che la caduta dell'entalpia isoentropica può essere valutato tramite l'espressione:

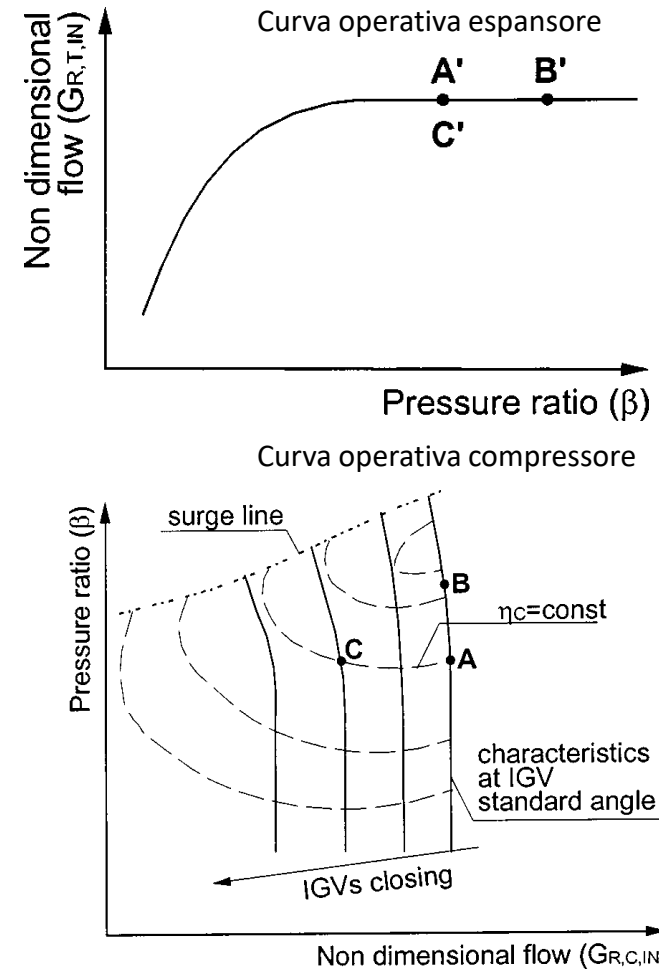
$$\Delta h_{is} = \int_{T_{FIN,IS}}^{T_{IN}} c_p(T) dT = \bar{c}_p (T_{IN} - T_{FIN,IS})$$
 È possibile distinguere l'effetto dovuto alla variazione del coefficiente c_p medio e quello dovuto alla variazione di caduta di temperatura lungo l'espansione (essendo quest'ultima influenzata dall'esponente della trasformazione isoentropica gamma, ovvero il rapporto tra i calori specifici). Incrementando la diluizione mediante vapore si determina un aumento del calore specifico della miscela, ma un simultaneo decremento dell'esponente gamma, che riduce la caduta di temperatura e conseguentemente incrementa la temperatura di uscita dalla turbina.



A causa della variazione della portata volumetrica causata da un differente combustibile (e diluente addizionale), l'uso di idrogeno influenza l'accoppiamento originale tra il compressore e l'espansore in una turbina a gas originariamente designata per funzionare tramite gas naturale. Le tipiche curve operative sono quelle in figura. Quando la macchina funziona ad idrogeno, avendo esso un potere calorifico più alto di quello del gas naturale, la portata di massa $G_{T,IN}$ (ove T indica la turbina), si riduce per un determinato flusso di compressore.

Nonostante ciò il flusso adimensionale $G_{R,T,IN}$ aumenta leggermente, a causa del fatto che si riduce la massa molecolare ($G_{R,T,IN} = G\sqrt{RT}/p$). Questo incremento diventa più e più importante quando la portata di massa $G_{T,IN}$ aumenta con l'aggiunta di diluente. Di conseguenza il cambiamento da gas naturale ad idrogeno rende impossibile operare allo stesso punto di funzionamento. Assumendo che A e A' siano i due punti di progetto per turbina e compressore nel caso di gas naturale, si possono mettere in atto due strategie:

- 1) Lasciare che il compressore lavori allo stesso punto A , allo stesso angolo delle VGV (variable guide vanes) e ridurre la $T_{T,IN}$, per ripristinare l'accoppiamento fluidodinamico tra il compressore e la turbina. L'espansore funziona nel nuovo punto di progetto A' .
- 2) Lasciando l'angolo delle VGV e la temperatura $T_{T,IN}$ al valore originario, $G_{R,T,IN}$ può essere aggiustato incrementando il rapporto di compressione (ad esempio passando dal punto A al punto B sulle caratteristiche del compressore, mentre il punto di funzionamento della turbina si sposta da A' a B'). Se il compressore non è in soffocamento, un β più alto riduce la portata di massa e aiuta a ripristinare l'accoppiamento.



La combustione dell'idrogeno e il diluente addizionale influenzano il sistema di raffreddamento sotto due aspetti:

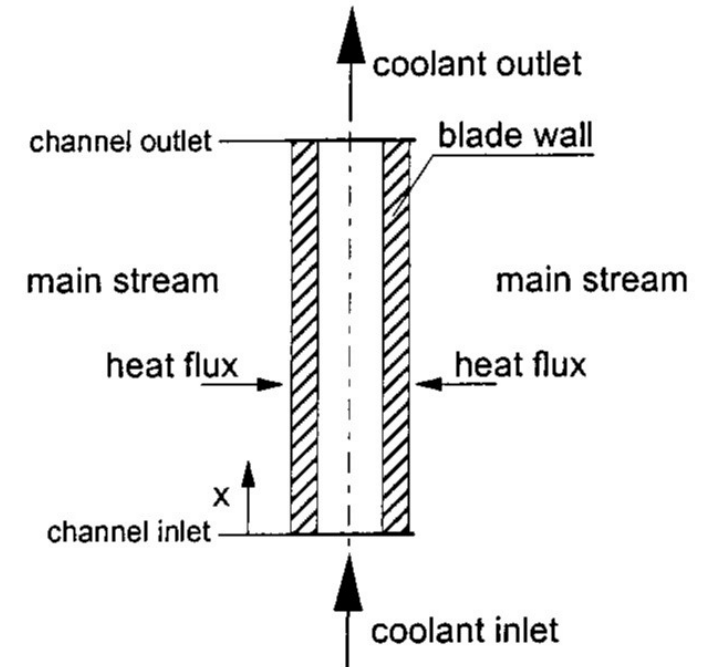
- la composizione variata del flusso caldo aumenta il coefficiente di scambio termico convettivo sul lato esterno della palettatura incrementando il flusso termico con conseguenze negative sulle performance del circuito di raffreddamento;
- il rapporto di compressione più alto incrementa il coefficiente di scambio termico convettivo su entrambi i lati della palettatura e la temperatura dell'aria usata nel circuito di raffreddamento le cui performance decadono.

La correlazione proposta da Louis ci consente di valutare il coefficiente di scambio termico medio sul lato esterno della palettatura:

$$h_{OUT} = 0,285 \frac{(\rho v)^{0,63} c_P^{1/3} k^{2/3}}{D^{0,37} \mu^{0,7}}$$

- v è la velocità del flusso principale riferito all'uscita finale
- k la conducibilità termica
- D la lunghezza della corda.

Il comportamento del circuito di raffreddamento come conseguenza di un cambiamento nella composizione del flusso principale può essere discusso considerando un circuito di raffreddamento convettivo semplificato. Esso consiste in un singolo condotto interno attraversato dal fluido di raffreddamento, in cui le sezioni trasversali della palettatura sono schematicamente mostrate nella figura a destra. La palettatura può essere considerata uno scambiatore di calore che attraversa il flusso, dove il fluido di raffreddamento assicura che la più alta temperatura raggiunta dal metallo rimanga entro i limiti stipulati. Innalzare il flusso termico sulla palettatura ad una portata di massa di raffreddamento costante causa un innalzamento delle temperature lungo i profili. Il vincolo sulla massima temperatura del metallo può essere ripristinato o incrementando la portata del flusso di raffreddamento o riducendo la temperatura del flusso in ingresso.



Un velivolo dimostrativo è fondamentale per lo sviluppo di nuove tecnologie aeronautiche. Viene utilizzato principalmente per testare e dimostrare la fattibilità di progetti, processi, combustibili, materiali e attrezzature, sia a terra che in aria. Queste informazioni vengono quindi utilizzate per perfezionare e certificare il prodotto finito. Airbus ha una lunga esperienza nel lancio di programmi dimostrativi per testare tecnologie pionieristiche. Il dimostratore ZEROe sarà ora il prossimo a testare tecnologie rivoluzionarie per l'aviazione a basse emissioni di carbonio. Presentato nel 2022, il dimostratore ZEROe utilizza una piattaforma multimodale A380 per testare la tecnologia di combustione dell'idrogeno.

Trasporterà quattro serbatoi di idrogeno liquido in posizione caudale, oltre a un motore a combustione di idrogeno montato lungo la fusoliera posteriore. Il sistema di distribuzione dell'idrogeno liquido confluirà in un sistema di condizionamento in cui l'idrogeno liquido si trasformerà nella sua forma gassosa prima di essere introdotto nel motore dove viene bruciato per la propulsione. Vi saranno inoltre una grande quantità di sensori e strumentazioni che forniranno dati molto importanti al fine di approfondire il funzionamento di questi sistemi in condizioni di volo. I dati saranno trasmessi alla flight test station a terra per poter essere analizzati. Durante tutta la durata del test di volo i piloti avranno l'importanza fondamentale di modificare la potenza alla quale il motore viene adoperato, monitorando i parametri fondamentali tramite appositi display. La dimensione della piattaforma fornisce grande flessibilità riguardo ciò che viene installato nelle diverse posizioni, permettendo inoltre un'evoluzione per quanto riguarda lo stoccaggio, la distribuzione e il sistema propulsivo nel corso del tempo, fino all'entrata in commercio.



Tuttavia, è necessario affrontare una serie di sfide prima che possa avvenire un'adozione diffusa dell'idrogeno.

Una sfida è come immagazzinare l'idrogeno a bordo dell'aeromobile. Oggi, lo stoccaggio dell'idrogeno liquido è tra le opzioni più promettenti, mentre lo stoccaggio dell'idrogeno sotto forma di gas compresso pone sfide con gli attuali requisiti di peso e volume degli aeromobili.

Inoltre i futuri sistemi di propulsione a idrogeno dovranno quindi raggiungere livelli di sicurezza equivalenti o migliori di quelli relativi agli odierni velivoli alimentati a cherosene, prima che gli aerei alimentati a idrogeno possano prendere il volo.

Un altro requisito chiave per un'adozione diffusa è il costo dell'idrogeno liquido. Gli elettrolizzatori, alimentati dall'elettricità generata da fonti rinnovabili, offrono la possibilità di ricavare idrogeno a basse emissioni tramite l'elettrolisi dell'acqua. Questo processo si traduce in "idrogeno verde". Meno dello 0,1% della produzione globale di idrogeno dedicato oggi è considerato idrogeno verde, ma questo potrebbe cambiare. L'Agenzia internazionale per l'energia (AIE) prevede che la rapida crescita del mercato delle energie rinnovabili, in particolare solare ed eolica, nel prossimo decennio aumenterà in modo esponenziale la disponibilità di elettricità rinnovabile, riducendone così i costi. La domanda di elettrolizzatori in grado di produrre idrogeno verde sta già crescendo rapidamente con una capacità prevista di elettrolizzatori di 40 GW nell'UE entro il 2030. La maggiore disponibilità di idrogeno verde contribuirà quindi a ridurre il costo fino al 30% entro il 2030 e al 50% entro il 2050.

Tuttavia, affinché l'idrogeno raggiunga davvero un'adozione diffusa nell'industria aeronautica, deve essere reso disponibile negli aeroporti di tutto il mondo. Una delle sfide principali è dunque lo sviluppo delle soluzioni di trasporto e infrastrutturali su larga scala necessarie per fornire agli aeroporti le quantità di idrogeno necessarie per alimentare gli aerei. Un recente studio dell'AIE suggerisce che il riutilizzo delle infrastrutture esistenti, compresi i milioni di chilometri di gasdotti utilizzati oggi per trasportare il gas naturale, potrebbe essere una soluzione conveniente. Quantità maggiori di idrogeno potrebbero quindi essere trasportate via gasdotto dai siti di produzione, mentre quantità minori potrebbero essere trasportate su camion.

La strada per una diffusa adozione dell'idrogeno nell'aviazione è ancora lunga, ma si prevede che il coordinamento internazionale tra le industrie sosterrà lo sviluppo dell'economia dell'idrogeno, sostenendo uno sforzo importante per aiutare a raggiungere gli ambiziosi obiettivi di decarbonizzazione globale nei prossimi due decenni.

- Atkins P., Jones L., Principi di chimica, Zanichelli, 2002
- Benini E., Propulsione aerea, Coop. Libreria Editrice Università di Padova, 2005
- Chiesa, P.; Lozza, G.; Mazzocchi, L. Using Hydrogen as gas turbine fuel, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, January 2005, 127:73-80, DOI: 10.1115/1.1787513
- <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2020-09-airbus-reveals-new-zero-emission-concept-aircraft>
- <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2020-11-hydrogen-combustion-explained>
- <https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2020-10-hydrogen-fuel-cells-explained>
- <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2022-02-the-zeroe-demonstrator-has-arrived>
- <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2020-10-hydrogen-in-aviation-how-close-is-it>

GRAZIE PER L'ATTENZIONE