

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

***Relazione per la prova finale  
«Studio dei bio-combustibili SAF sulle  
prestazioni dei turbogetti e turbofan  
aeronautici»***

Tutor universitario: Prof. Ernesto Benini

Laureando: *Zatta Alessandro*

Padova, 15/11/2023

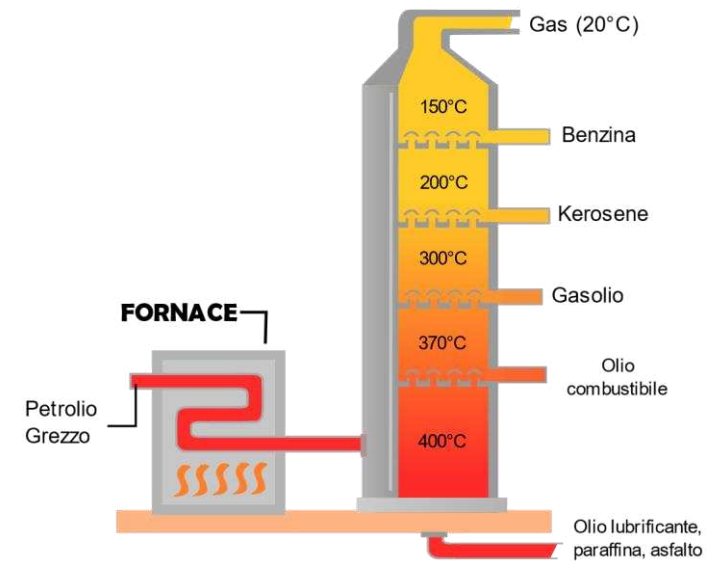
L'efficacia del processo di combustione e il livello delle emissioni di fuliggine sono fortemente correlati alla composizione e alle caratteristiche del combustibile.

Convenzionalmente è:

- Estratto dal petrolio greggio nelle frazioni intermedie del distillato
- Costituito principalmente da alcani, ramificati e ciclici, e aromatici

Il combustibile più utilizzato è il **JET-A1**, ovvero cherosene additivato con

- Anticorrosivi, come HITEC E-580 o NALCO 5403  
hanno lo scopo di inibire la corrosione dei metalli circostanti;
- Antistatici, come ANTIS JF3 o STADIS 450  
aumentano la conduttività elettrica del carburante distillato per ridurre al minimo il rischio di scariche elettrostatiche e accensione durante la manipolazione.



Per garantire un funzionamento sicuro ed economico del motore aeronautico, il carburante per aerei deve soddisfare alcune caratteristiche fondamentali:

- Stabilità termica
- Densità
- Atomizzazione
- Manipolazione
- Pulizia e contaminazione
- Lubrificazione

I principali prodotti emessi dai motori a reazione sono anidride carbonica **CO<sub>2</sub>** e vapore acqueo **H<sub>2</sub>O**, insieme a emissioni in quantità minore come monossido di carbonio **CO**, ossidi di azoto **NO<sub>x</sub>**, ossidi di zolfo **SO<sub>x</sub>**, idrocarburi non bruciati **UHC** e particolato **PM**.

L'indice di emissione per qualsiasi inquinante è dato come:

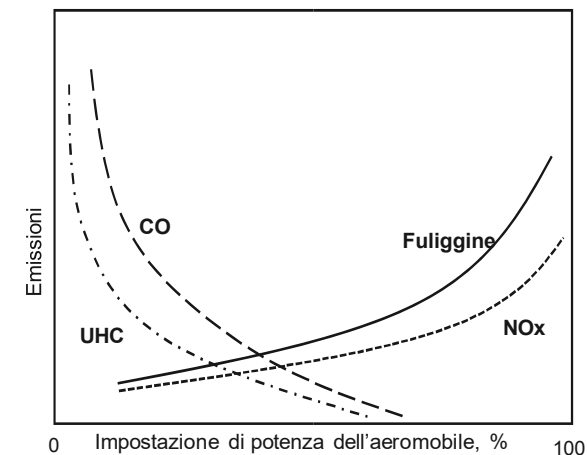
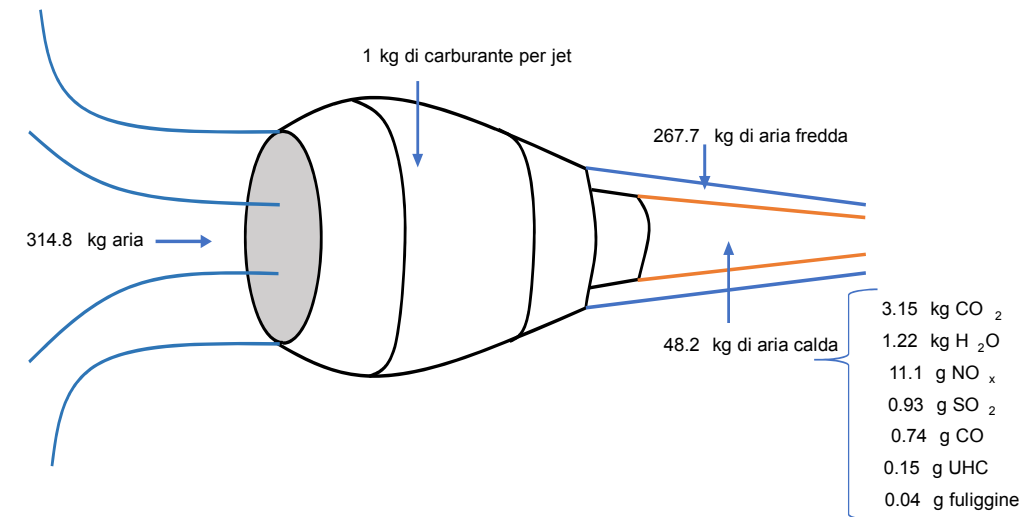
$$\text{Indice di emissione } EI_i = \frac{\text{portata massica delle specie inquinanti}}{\text{portata massica del carburante}} = \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_f}$$

L'indice di emissione di ogni specie viene calcolato sulla base dell'indice dell'anidride carbonica come segue:

$$EI_i = EI_{CO_2} * \frac{MW_i}{MW_{CO_2}} * \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_{CO_2}}$$

Poiché NO<sub>x</sub> è costituito da due composti, NO e NO<sub>2</sub>, l'indice di NO<sub>x</sub> viene calcolato sulla base dell'ipotesi che questi composti abbiano la stessa massa:

$$EI_{NO_x} = EI_{NO_2} + EI_{NO} \frac{46}{30}$$



L'introduzione di combustibili sostenibili per l'aviazione (**SAF**) risulta essere fondamentale quando si parla di impatto ambientale dell'aviazione. I carburanti sostenibili per l'aviazione devono essere:

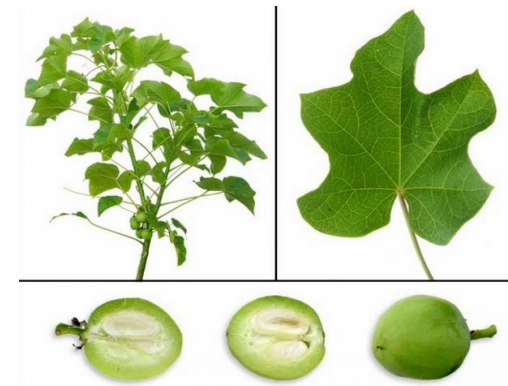
- Derivanti da fonti non fossili
- «Drop in fuels»
- Certificati ASTM D-7566
- Sostenibili in relazione agli obiettivi economici, sociali e ambientali

Sono attualmente approvati 7 percorsi di conversione con materie prime diverse da derivanti da fonti fossili:

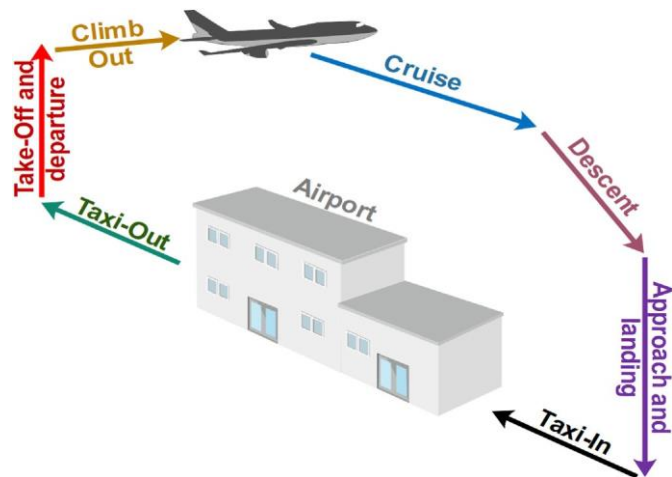
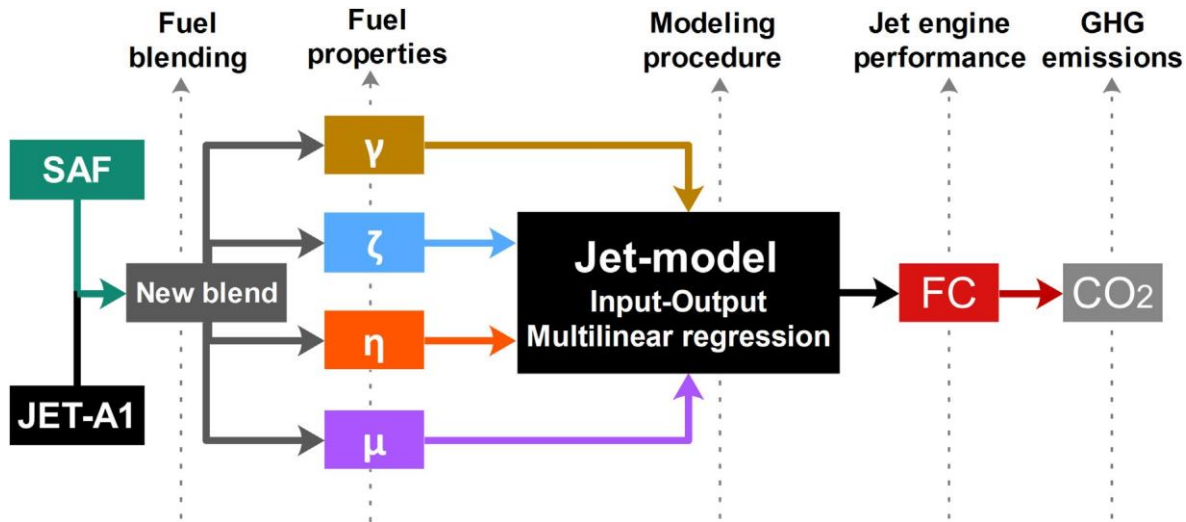
- Cherosene isoparaffinico sintetizzato Fischer-Tropsch (**FT-SPK**)
- Cherosene paraffinico sintetizzato, idrotrattamento di esteri e acidi grassi (**HEFA-SPK**)
- Zuccheri fermentati idrotrattati in isoparaffiniche sintetiche (**HFS-SIP**)
- Cherosene paraffinico sintetico con aromatici tramite Fischer-Tropsch (**FT-SPK / A**)
- Alcol al cherosene paraffinico sintetizzato a getto (**ATJ-SPK**)
- Cherosene sintetizzato idrotermolisi catalitica (**CHJ**)
- Cherosene isoparaffinico sintetizzato da esteri e acidi grassi idrocarburici (**HC-HEFA-SPK**)



- Camelina



- Jatropha Curcas



Si tratta di un modello di regressione multilineare che consente sulla base di un insieme noto di proprietà, di produrre stime accurate del consumo di carburante per aerei.

$$a_{JET} = a_{\gamma} * \gamma(X_{SAF}) + a_{\zeta} * \zeta(X_{SAF}) + a_{\eta} * (X_{SAF}) + a_{\mu} * \mu(X_{SAF})$$

L'accuratezza del modello è caratterizzata e controllata da:

- Coefficiente R-quadro
- Errore standard
- Valore p

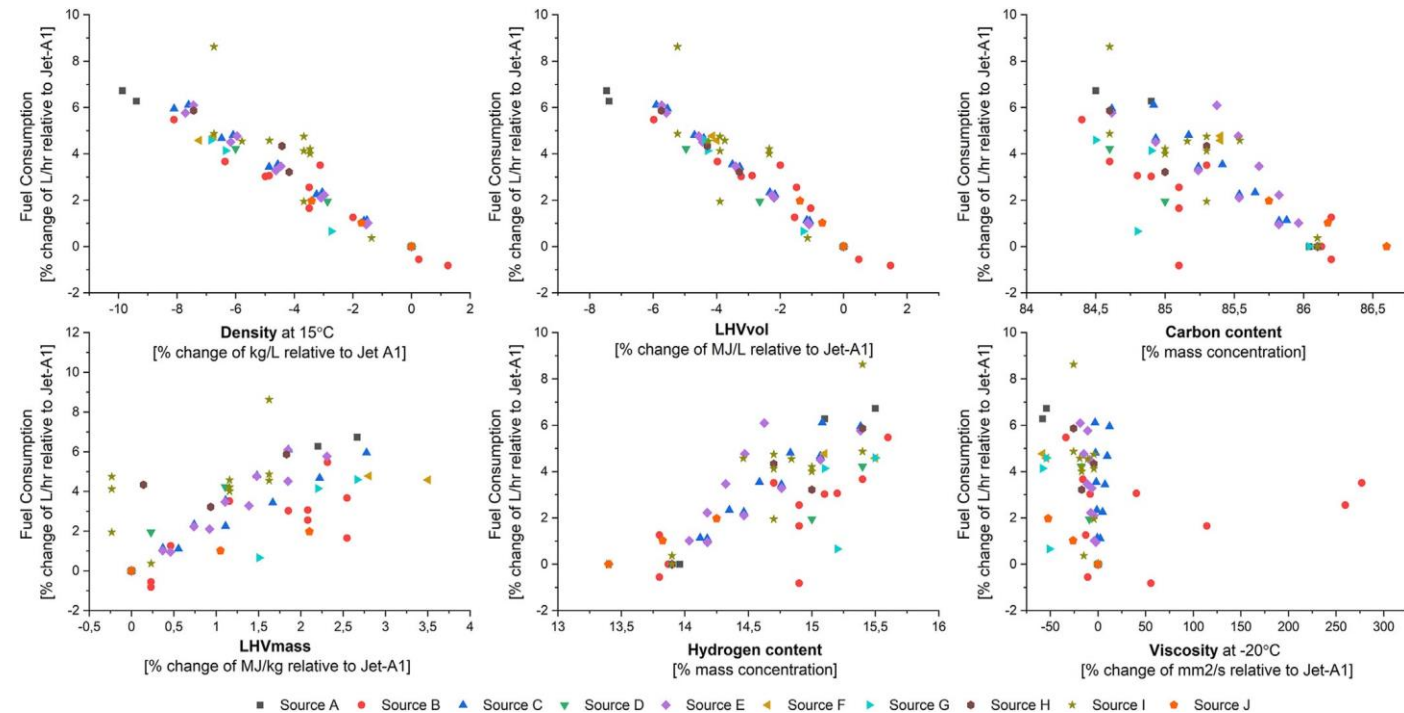
Il Jet-model può essere applicato a:

- Calcoli del consumo di carburante per SAF
- Ottimizzazione del volume, della massa o del consumo di energia del carburante
- Riduzione dei costi e dei tempi per i test sperimentali
- Stima della parte TTT delle emissioni di CO2

In relazione al consumo di carburante, sono state riportate proprietà del carburante come:

- Viscosità
- Densità
- Potere calorifico inferiore basato sulla massa LHV<sub>mass</sub>
- Potere calorifico inferiore basato sul volume LHV<sub>vol</sub>
- Contenuto di carbonio e idrogeno

Variabile	Coefficiente	Errore standard	Valore p
Viscosità $\gamma$	0,0039	0,0007	> 0,0001
Densità $\zeta$	0,9030	0,0323	> 0,0001
LHV <sub>mass</sub> $\eta$	0,6101	0,0977	> 0,0001
R-Quadro	0,993		



La **densità** e **LHV<sub>mass</sub>** influenzano il contenuto energetico fornito al motore per la conversione in spinta. La **viscosità** invece garantisce una corretta atomizzazione del carburante e la sua evaporazione delle goccioline a basse temperature. Si può riscrivere l'equazione finale del Jet-model come segue:

$$a_{JET} = 0,0039 * \gamma - 0,9030 * \zeta - 0,6101 * \eta$$

Le prestazioni del motore a reazione sono comunemente rappresentate da:

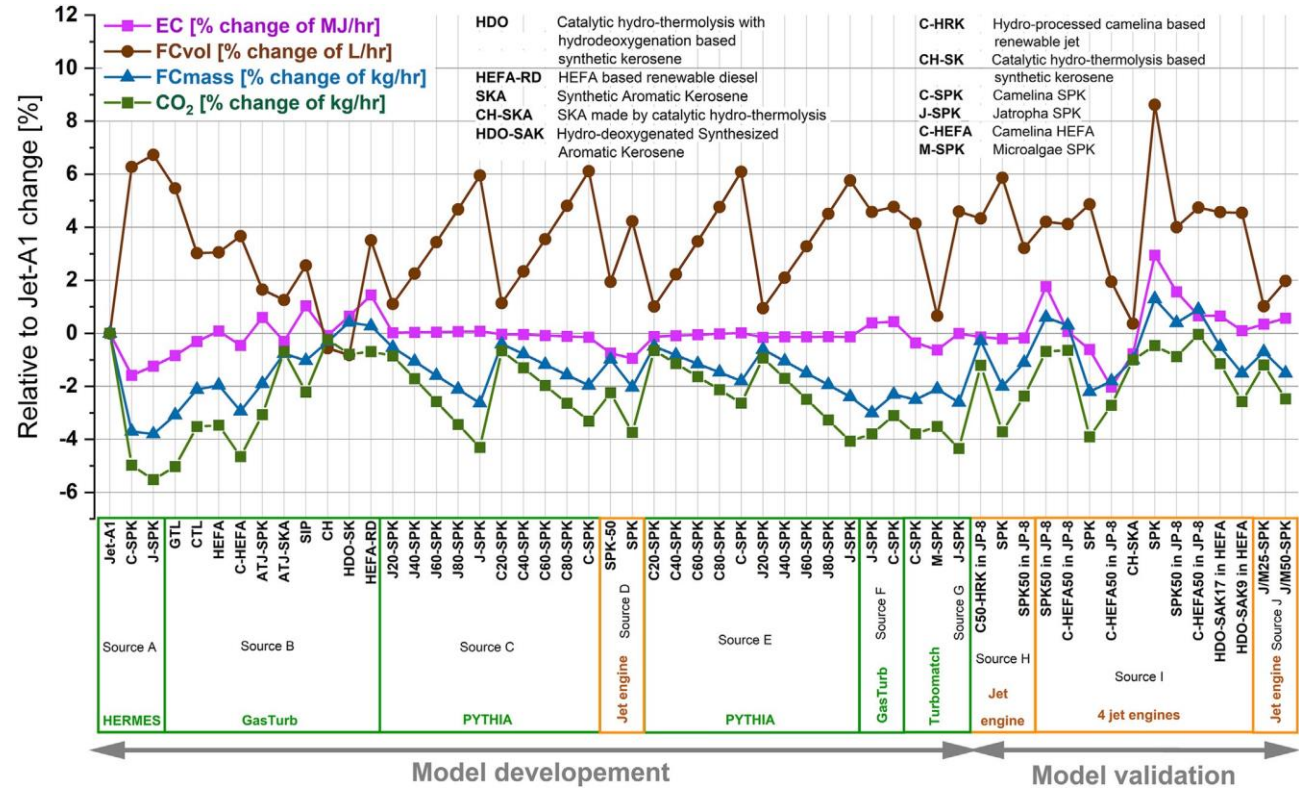
- Consumo di carburante volumetrico
- Consumo di carburante basato sulla massa
- Contenuto energetico
- Emissioni di CO<sub>2</sub>

Le emissioni di CO<sub>2</sub> vengono calcolate in base alla densità e al contenuto di carbonio del combustibile:

$$CO_2 = a_{JET_{ABS}} * \rho * Z * \frac{44.01}{12.0107}$$

Il consumo di energia EC invece è calcolato sulla base di FC e del contenuto calorifico:

$$EC = a_{JET_{ABS}} * LHV_{JET_{ABS}}$$



Il Jet-model sviluppato è stato utilizzato per simulare le prestazioni di utilizzo di cinque carburanti certificati ASTM D-7566:

- FT-SPK
- HEFA
- FT-SPK/A
- SIP
- ATJ-SPK

Le proprietà di ogni combustibile SAF sono state prese per la stima delle prestazioni, considerate in miscele con Jet-A1 fossile all'interno dell'intero spettro di miscelazione.

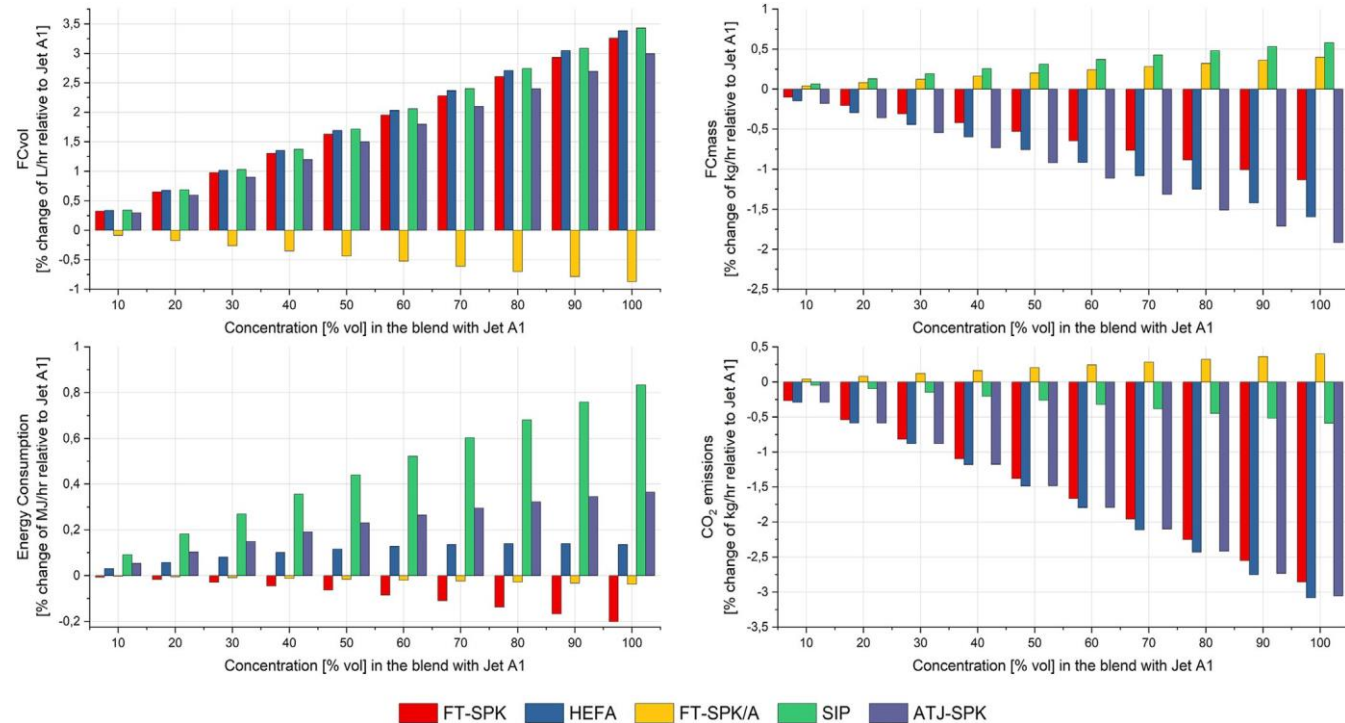
I risultati del Jet-model hanno portato queste variazioni in percentuale rispetto allo standard Jet-A1:

$$(FT-SPK/A) \quad -0,85\% \leq FC_{vol} \leq 3,72\% \quad (SIP)$$

$$(ATJ-SPK) \quad -2,09\% \leq FC_{mass} \leq 0,87\% \quad (SIP)$$

$$(FT-SPK) \quad -0,18\% \leq EC \leq 1,12\% \quad (SIP)$$

$$(HEFA) \quad -3,22\% \leq CO_2 \leq 0,42\% \quad (FT-SPK/A)$$





La spinta è la forza che muove un aereo attraverso l'aria. La spinta è generata dal sistema di propulsione dell'aereo ed è data da:

$$F = \dot{m}_e V_e - \dot{m}_0 V_0 + (p_e - p_0) A_e$$

$$\dot{m} = \rho * V * A$$

Per ottenere quella spinta è importante conoscere anche la quantità di carburante utilizzata. **TSFC**, «thrust specific fuel consumption» è la massa di carburante bruciato in un ora sulla spinta generata dal motore.

$$TSFC = \frac{\dot{m}_f}{F}$$

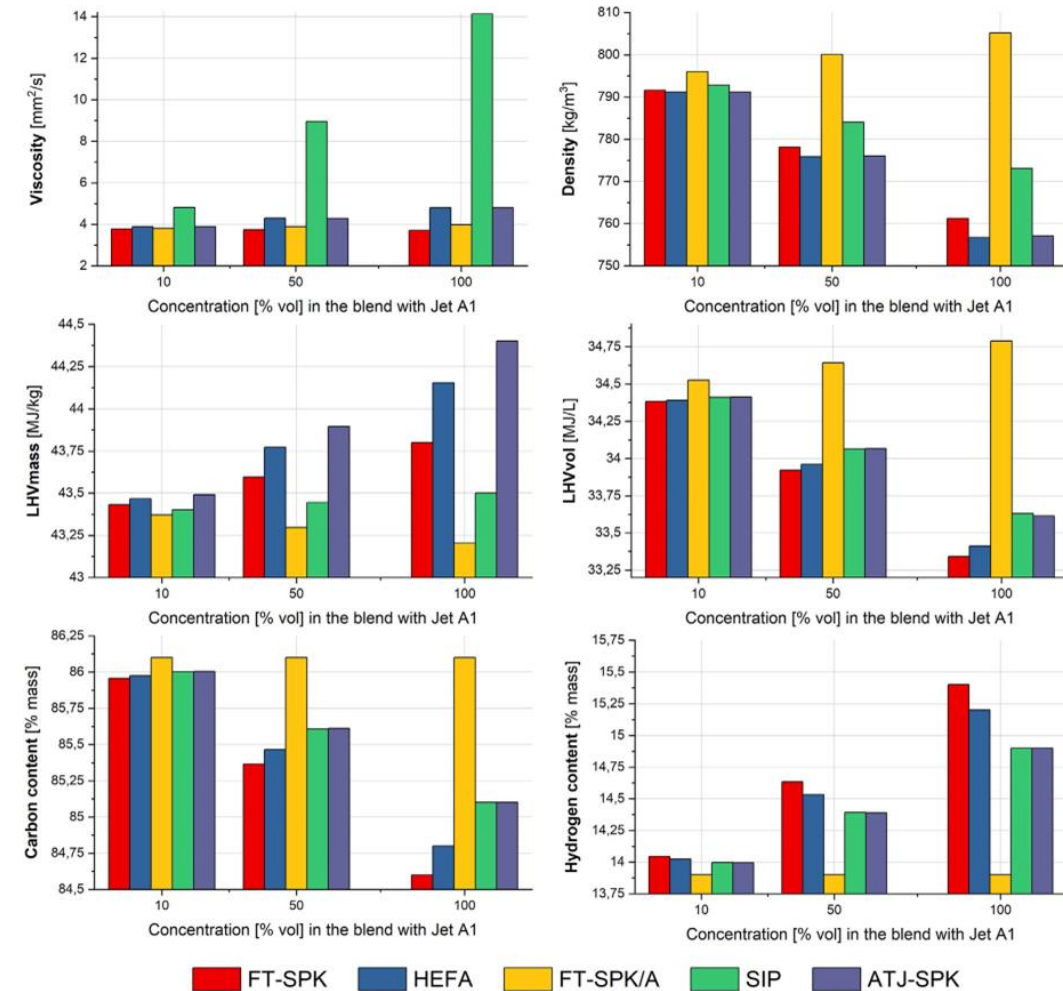
Un valore basso di TSFC corrisponde ad una alta efficienza, al contrario un alto valore di TSFC indica una bassa efficienza.

Il rendimento globale di un motore aeronautico invece è dato dal rapporto tra la potenza propulsiva e la potenza disponibile nel combustibile:

$$\eta_o = \frac{P_p}{P_{av}}$$

$$P_p = F V_0$$

$$P_{av} = \dot{m}_f LHV_{mass}$$



# GRAZIE PER L'ATTENZIONE

## RIFERIMENTI:

- Cheng Tung hong, Jo-Han Ng – Biojet Fuel in Aviation Applications, Production, Usage and Impact of Biofuels – 2021
- Department of Aerospace Engineering, Indian Institute of Technology Kanpur – Combustion and emission characteristics from biojet fuel blends in a gas turbine combustor – 2019
- Yuri Kroyan – Modeling the impact of sustainable aviation fuel properties on end-use performance and emissions in aircraft jet engines - 2022
- [Glenn Research Center | NASA](#)