

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

Relazione per la prova finale

**«POSSIBILI SVOLTE ECOLOGICHE NELLA
PRODUZIONE E NELL'IMPIEGO DI JET FUELS»**

Tutor universitario: Prof.ssa Roberta Bertani

Laureando: Pietro Pinton

Matricola: 1216846

Padova, 20/11/2023

Consumo attuale del settore aeronautico di 363 miliardi di litri di carburante all'anno, con un aumento annuo di 11 miliardi di litri.

IMPATTO AMBIENTALE: L'industria aeronautica è responsabile del 12% delle emissioni di CO₂ del settore dei trasporti, e del 2% di quelle globali.

IMPATTO ECONOMICO: il carburante incide per il 30-50% sui costi di gestione di una compagnia aerea. Attualmente il prezzo del JF si attesta appena sotto i 1000\$/tonnellata.

POSSIBILI ALTERNATIVE:

- Alimentazione ad idrogeno
- Sviluppo di tecnologie ibride o elettriche
- Uso di biocarburanti puri o in blend



È necessaria una transizione tecnologica che non generi problemi di compatibilità nell'industria, dunque lo sviluppo di biocarburanti si mostra come la soluzione più praticabile.

Il JF è composto principalmente da 4 famiglie chimiche: alcani a catena lunga, ramificati, cicloalcani e composti aromatici.

- Paraffine: garantiscono elevate caratteristiche di rilascio di calore ed una combustione pulita;
- Paraffine cicliche: conservano la fluidità a basse temperature.

JET FUELS AD USO COMMERCIALE:

JET A: carburante standard negli USA; deve avere un punto di infiammabilità minimo di 38°C ed un punto di congelamento non superiore a -40°C.

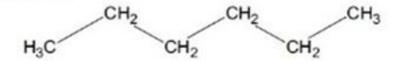
JET A-1: sostanzialmente identico al JET A, ma l'aggiunta di additivi ne porta il punto di congelamento a -47°C.

JET B: composto da 30% di cherosene e 70% di benzina, che lo rende più volatile e pericoloso, ma allo stesso tempo è in grado di operare a temperature inferiori a -50°C.

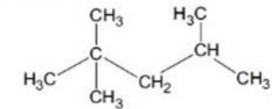
EFFETTO DELLE BASSE TEMPERATURE SUI JF:

- Freezing Point: cristallizzazione degli idrocarburi e perdita di fluidità
- Pour Point: completa torbidità del carburante
- Solidificazione

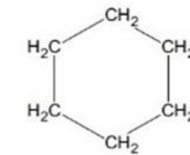
n-alkanes



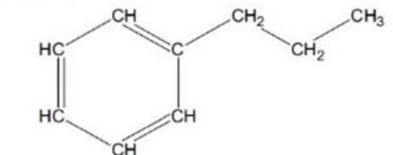
iso-alkanes



cycloalkanes



aromatics



- **Stabilità termica:** si riferisce alla misurazione della quantità di deposito formatasi nel sistema di alimentazione del motore, a causa del riscaldamento del carburante. Qualsiasi JF utilizzato nei motori aeronautici deve essere termicamente stabile contro l'ossidazione e la polimerizzazione in un'ampia gamma di temperature operative durante il volo.
- **Caratteristiche di combustione:** L'efficacia del processo di combustione del carburante e il livello delle emissioni di fuliggine sono fortemente legati alla composizione del carburante. Le paraffine offrono le migliori caratteristiche di combustione, mentre i composti aromatici, tendono a produrre fuliggine.
- **Raggio operativo:** Un carburante con bassa densità indica un basso valore calorico per unità di volume e indica una ridotta autonomia di volo per un dato volume di carburante (minimo 775 kg/m^3).
- **Compatibilità:** La compatibilità con elastomeri e metalli nel sistema di alimentazione del carburante e nella turbina è un fattore critico per garantire la durata e il funzionamento sicuro di tutti i sistemi.
- **Stabilità e facilità di conservazione**
- **Presenza di contaminanti**
- **Proprietà lubrificanti**

Tutte le caratteristiche sono normate nella direttiva ASTM D1655.



Della totalità delle emissioni dell'industria aeronautica:

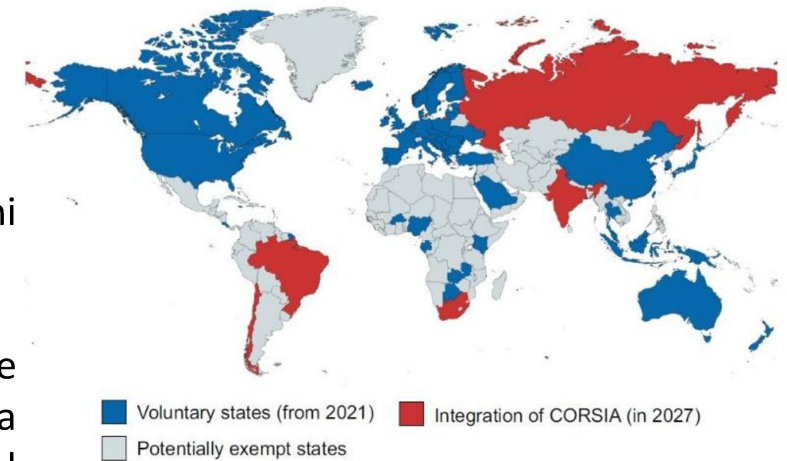
- 65% prodotte da voli internazionali, sotto la responsabilità dell'ICAO;
- 35% prodotte da voli domestici, sotto la responsabilità dei singoli stati.

Programma **CORSIA** promosso dall'ICAO per la compensazione delle emissioni dell'aviazione internazionale; la fase pilota è attiva dal 2021.

ICAO riconosce lo sviluppo di AJF come un elemento importante per la riduzione delle emissioni nell'ambito del programma CORSIA, promuovendone lo sviluppo tramite la Risoluzione A40-18; se il candidato carburante rispetta i parametri imposti dal programma, diventa un CORSIA Eligible Fuel.

Programma **FlightPath2050** promosso dall'UE per lo sviluppo di prodotti sostenibili per l'aviazione civile; vengono posti cinque obiettivi principali:

- Soddisfare le esigenze della società e del mercato;
- Mantenere ed estendere la leadership industriale;
- Proteggere l'ambiente e l'approvvigionamento energetico;
- Garantire sicurezza e protezione;
- Dare priorità alla ricerca, alle capacità di test e all'istruzione.



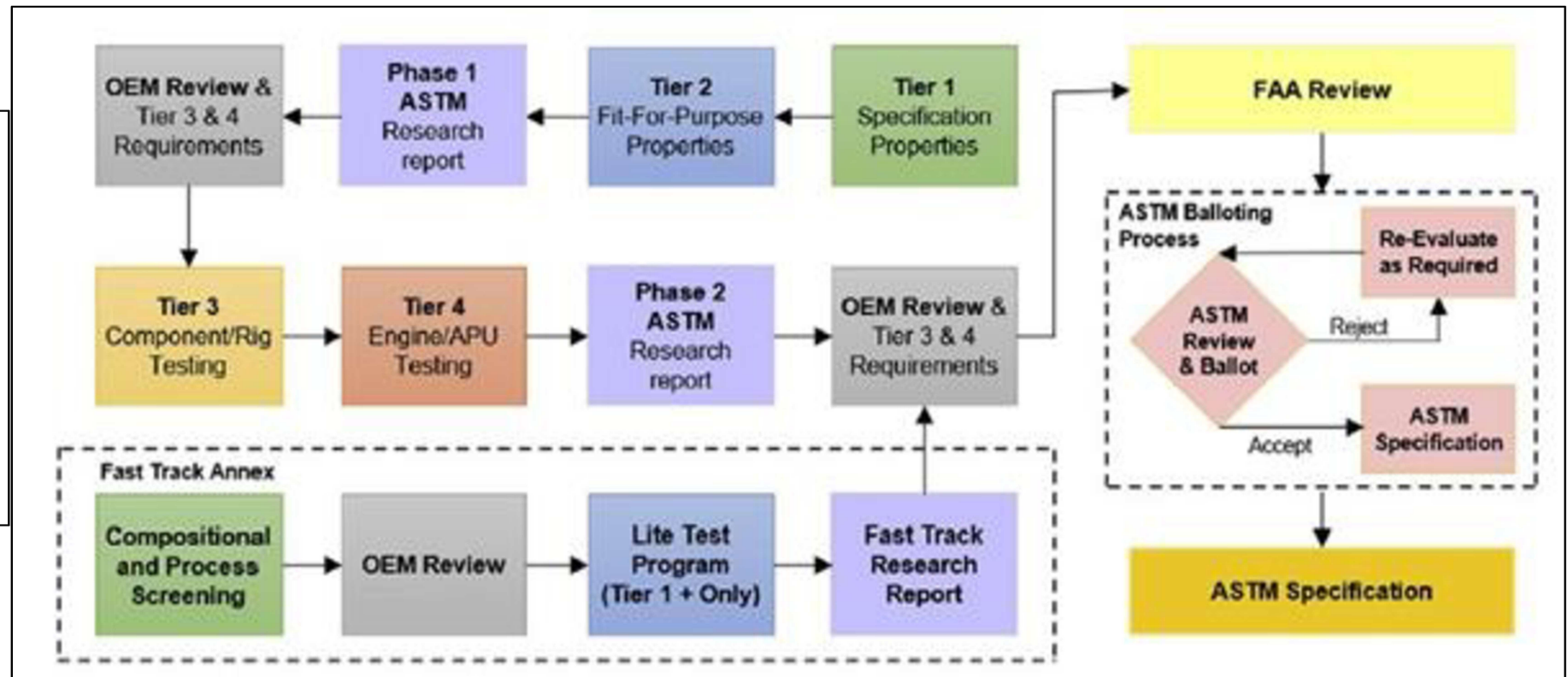
Il processo di certificazione è principalmente regolamentato da due normative emesse da ASTM:

- ASTM D7566: “Norma di Specifica per il Carburante per Turbina per Aviazione Contenente Idrocarburi Sintetizzati”
- ASTM D4054: “Norma di Pratica per la Qualificazione e l'Approvazione dei Nuovi Carburanti per Turbine per Aviazione e Additivi per Carburanti”.

Un AJF che soddisfa le norme della D7566 può essere considerato come una sostituzione "plug-and-play" per i carburanti D1655, e può essere integrato nell'infrastruttura esistente, progettata per supportare il carburante convenzionale.

L'ASTM D4054 è stata sviluppata per fornire le linee guida in merito ai test e agli obiettivi in termini di proprietà necessari per valutare un candidato AJF.

Viene schematizzata la procedura per i test dei carburanti e degli additivi, come normati dall'ASTM D4054. Il programma di test vede quattro fasi principali, ognuna di esse comprendente una serie di test, intervallati dalla stesura di appositi rapporti.



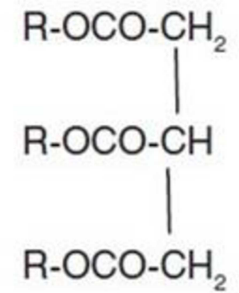
La tecnologia HEFA combina l'idrotrattamento e l'isomerizzazione per convertire i trigliceridi in idrocarburi (iso)paraffinici nella gamma dei JF:

- Si tratta della tecnologia per AJF più avanzata al giorno d'oggi;
- È certificata dall'ASTM dal 2011 per l'uso in miscela con il JF tradizionale, in percentuali fino al 50%;

PROCESSO DI PRODUZIONE

Il processo si compone di due fasi principali:

- **Idrotrattamento:** consiste nella rimozione dell'ossigeno, ottenendo così un distillato paraffinico (BP >150°C). La rimozione dell'ossigeno può essere ottenuta tramite due percorsi:
 - Idrogenazione della catena degli acidi grassi, con produzione di acqua e di un prodotto paraffinico, mantenendo la lunghezza della catena idrocarburica: $C_{18} + 16H_2 \rightarrow 3C_{18} + 6H_2O + C_3H_8$. Per 100kg di olio si ottengono circa 86,3 kg di cherosene.
 - Idrogenazione della catena degli acidi grassi con produzione di ossidi di carbonio (come CO₂ e CO), e un prodotto paraffinico, con una perdita di un atomo di carbonio nella lunghezza della catena $C_{18} + 7H_2 \rightarrow 3C_{17} + CO_2 + C_3H_8$. Per 100kg di olio si ottengono circa 81kg di cherosene.
- **Idroisomerizzazione:** Per migliorare le proprietà di scorrimento a basse temperature del prodotto, è necessario sottoporlo a questo trattamento, che convertirà le paraffine lineari in iso-paraffine. Ciò migliora le prestazioni a basse temperature per le applicazioni del combustibile, ma ha un effetto negativo sul numero di cetano nelle applicazioni dei motori diesel.



Vengono miscelati due diversi JF convenzionali (JF A e JF B), entrambi di tipo A-1, con quantità variabili di due diversi combustibili HEFA, le cui proprietà sono descritte in tabella.

JF A: Questo carburante ha un tipico punto di congelamento di -49.6°C e viene quindi scelto un basso rapporto di miscelazione del 10%, 20% e 30% in volume per HEFA1, a causa del punto di congelamento di -27°C di questo prodotto. HEFA2, invece, ha un eccellente punto di congelamento di -57.5°C e può essere quindi miscelato in concentrazione elevata, al 75% in volume.

JF B: Questo carburante ha un eccellente punto di congelamento di -64.9°C , consentendo una maggiore flessibilità nella miscelazione di HEFA1 con una gamma di concentrazione del 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70% in volume. Anche se non sono previsti problemi di punto di congelamento per la miscelazione di HEFA2, viene scelta una vasta gamma di concentrazioni del 25%, 40%, 50%, 60% e 75% in volume, per verificare se altri vincoli di specifica potessero limitarne l'incorporazione.

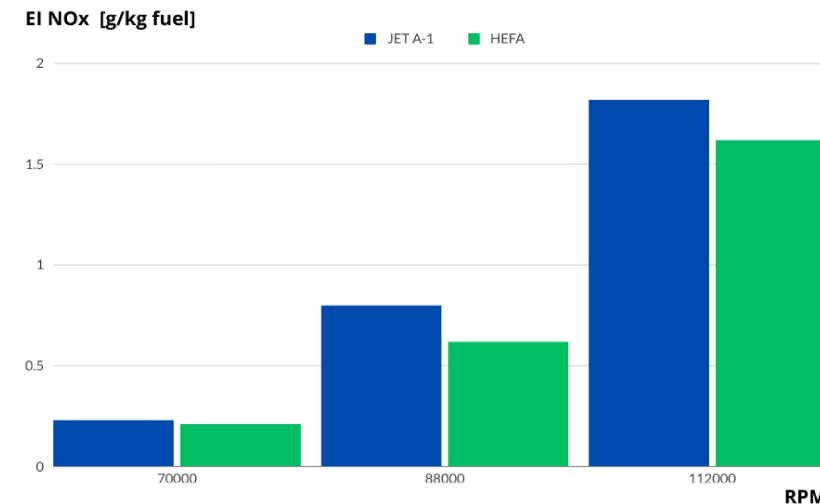
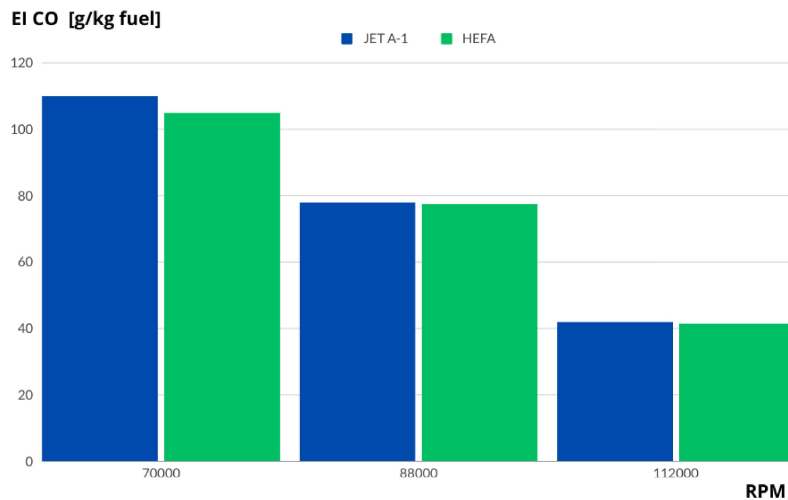
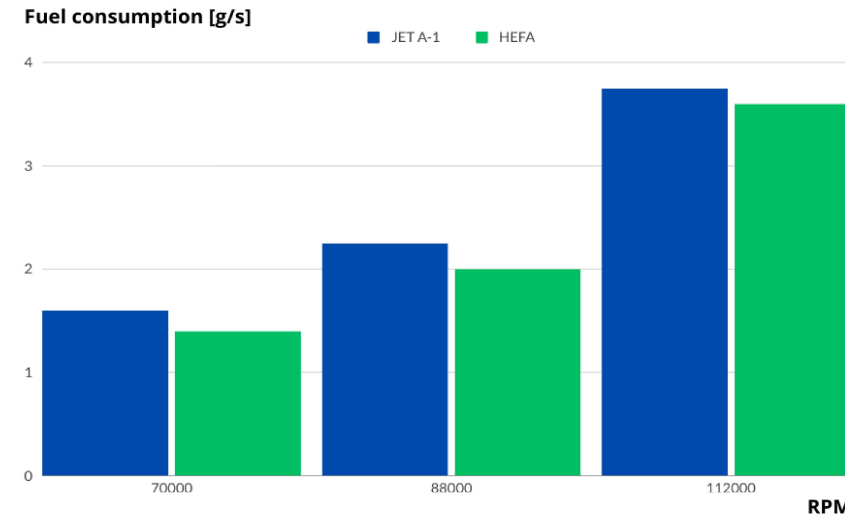
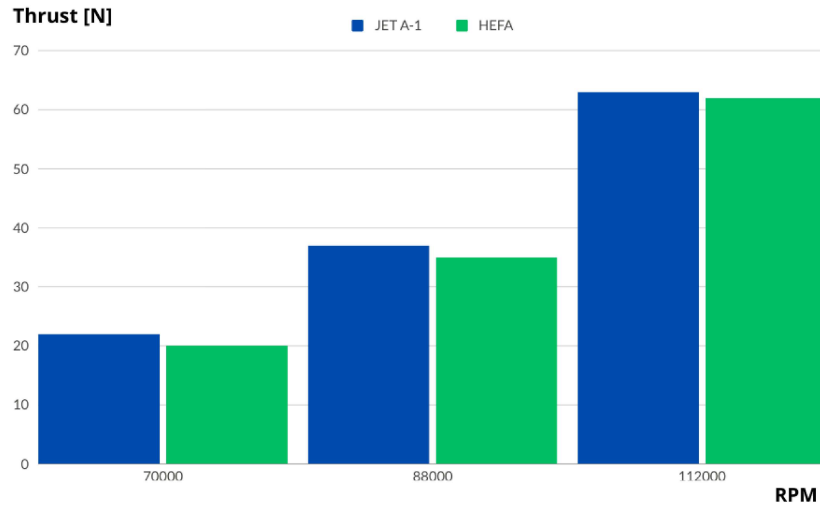
Cold flow properties of HEFA1 and HEFA2

Analysis	Unit	HEFA1	HEFA2
Freezing point	$^{\circ}\text{C}$	-27°C	-57.5°C
Viscosity at -20°C	mm^2/s	11.72	7.52

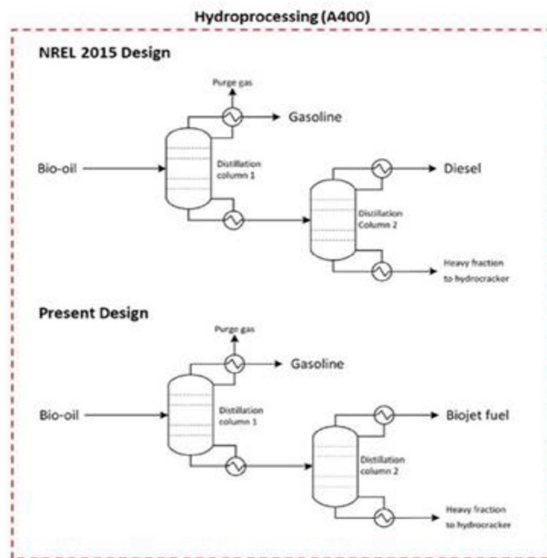
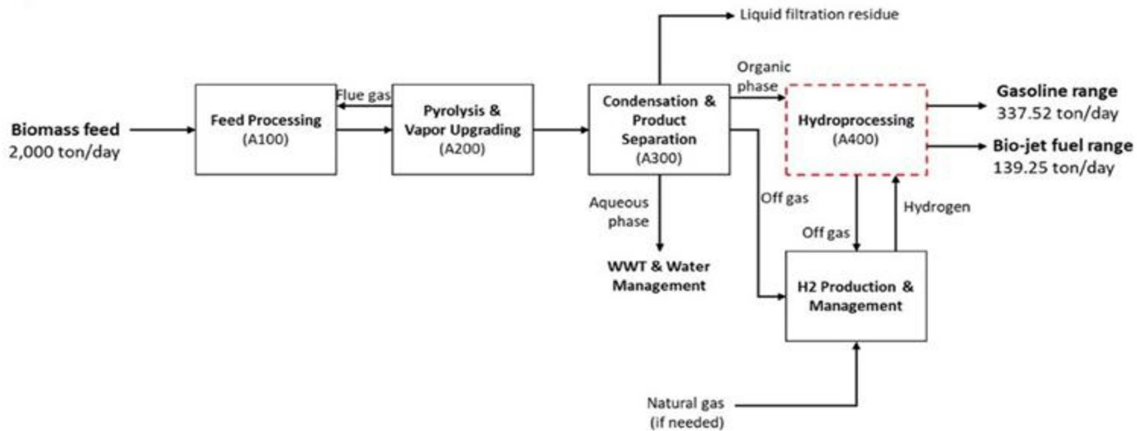
RISULTATI

Tutte le miscele prodotte hanno densità che corrispondono a quelle previste, inoltre tutte le miscele soddisfano le specifiche ASTM attuali, ad eccezione del punto di congelamento (per alcune miscele con HEFA1) e del contenuto aromatico (miscela con HEFA2).

Viene effettuato un test in scala tramite un Miniature Jet Engine Test Rig, alimentato prima con Jet A-1 classico, e successivamente con una miscela di Jet A-1 con il 48% di idrocarburi sintetici derivanti da HEFA.

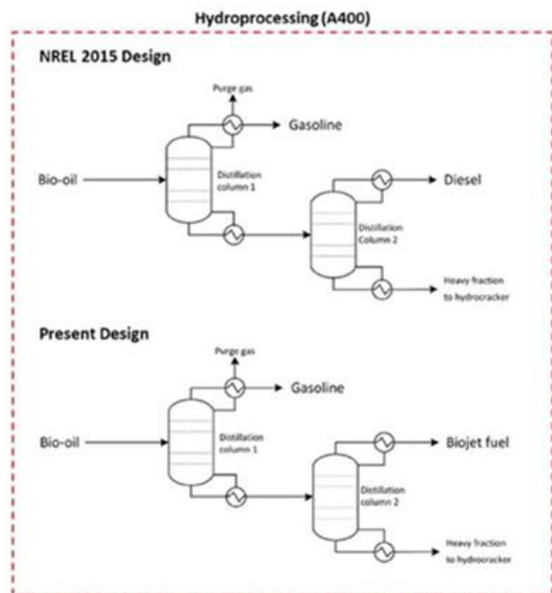
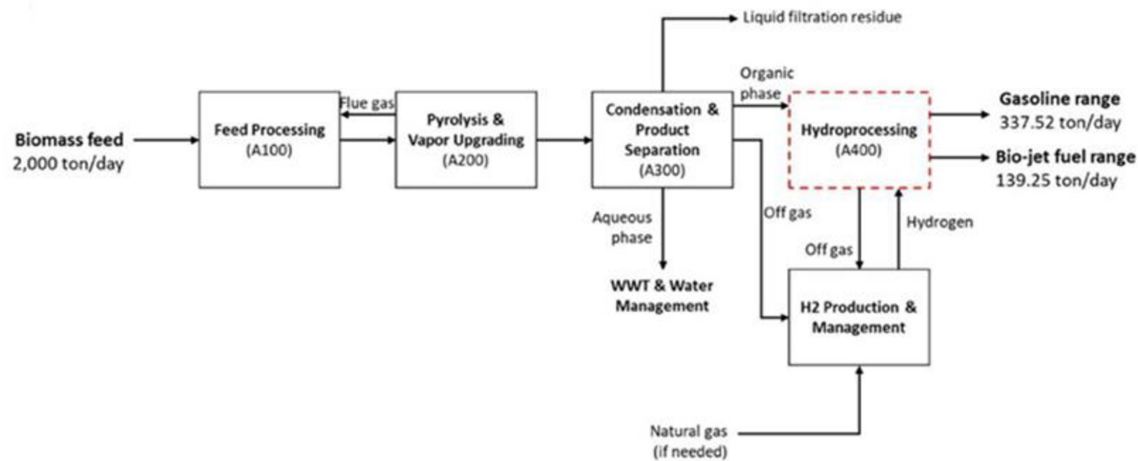


La pirolisi ha il potenziale per consentire di sostituire il consumo di petrolio come fonte di carbonio sostenibile, utilizzando come materia prima diverse biomasse di rifiuti solidi, come rifiuti urbani, scarti agricoli e forestali.



DESCRIZIONE DEL PROCESSO

- **Area 100:** elaborazione del materiale di alimentazione; viene utilizzato un essiccatore per riscaldare il materiale di alimentazione prima che venga introdotto nel reattore sfruttando il calore dai gas di scarico.
- **Area 200:** pirolisi e upgrading del vapore; la biomassa di alimentazione è sottoposta a pirolisi e i vapori pirolitici sono processati. La biomassa di alimentazione entra nel reattore attraverso un alimentatore; qui, la biomassa di alimentazione mescolata con il catalizzatore viene fluidificata con un gas che contiene idrogeno. Il reattore è operato ad una pressione di circa 8 bar e a una temperatura di 400 °C.
- **Area 300:** condensazione e separazione dei prodotti; I gas prodotti vengono condensati per separare i vapori dai gas non condensabili. Il vapore rimanente viene quindi raffreddato utilizzando uno scambiatore di calore indiretto. La frazione acquosa viene trasportata al trattamento delle acque reflue, mentre la frazione organica viene inviata all'area di idrotrattamento. Il gas non condensabile viene inviato al reattore di pirolisi rapida come gas fluidificante.



- **Area 400:** idrotattamento; viene introdotto idrogeno nella miscela. Si ha il processo di idrogenolisi, in cui il legame carbonio-zolfo viene scisso e un atomo di idrogeno è legato sia al carbonio che all'atomo di zolfo. Attraverso questo processo, lo zolfo può essere rimosso fino a raggiungere un livello accettabile. Successivamente, il prodotto viene frazionato nelle gamme di idrocarburi della benzina e del JF.

Si possono inoltre integrare all'impianto una serie di sistemi ausiliari:

- **Area 500:** produzione e gestione di H₂;
- **Area 600:** sistema a vapore e generazione di energia;
- **Area 700:** servizi di raffreddamento;
- **Area 800:** gestione delle acque reflue e dell'acqua.

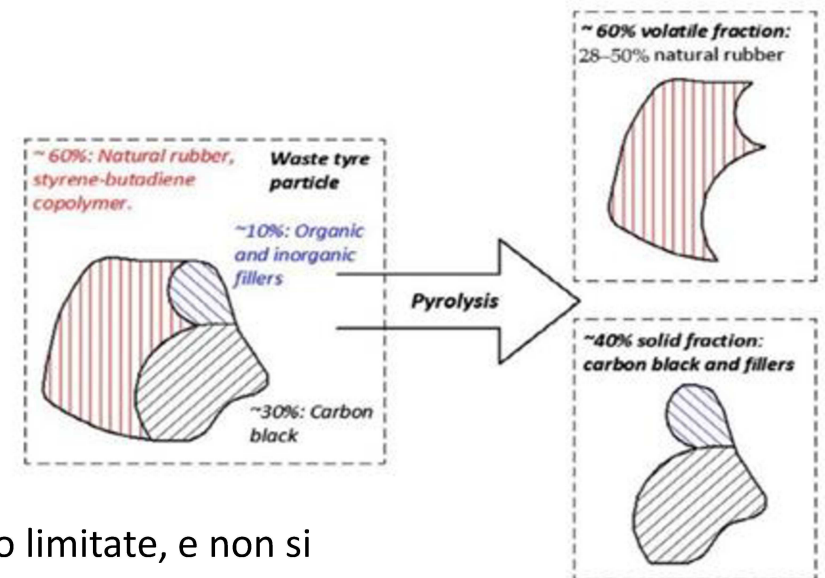
La materia prima di partenza, è composta circa per il 60% da gomma naturale e gomma sintetica, per il 30% da nero di carbonio e per il 10% da riempitivi organici e inorganici; durante il processo viene decomposta in una frazione volatile (60%) ed una frazione solida (40%).

Decomposizione termica delle gomme: Gli pneumatici sono composti principalmente da elastomeri, i quali contengono legami C-C; proprio qui avviene la rottura della catena, accompagnata dal trasferimento di idrogeno, con conseguente diminuzione del peso molecolare del segmento di catena.

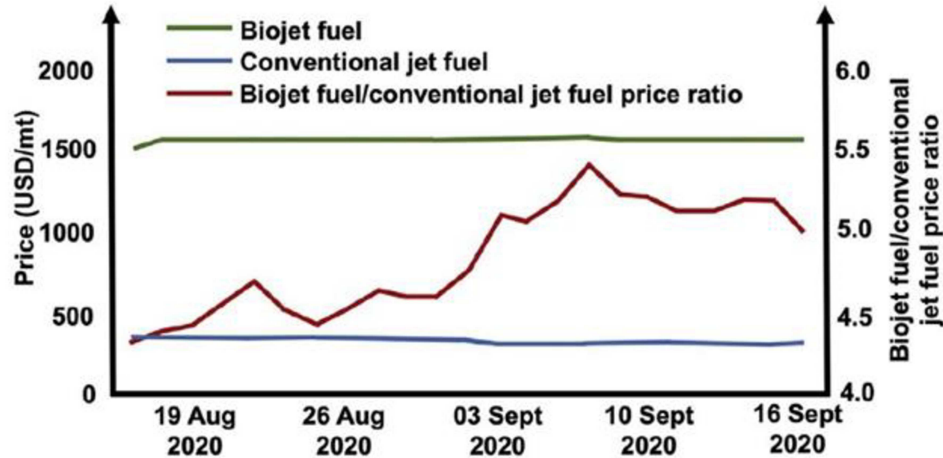
Durante la pirolisi, queste molecole di elastomero si degradano attraverso reazioni di cracking termico, producendo idrocarburi leggeri, oli, gas e residui carboniosi.

Al termine del processo di decomposizione termica si ottengono tre prodotti:

- **Char:** frazione solida, può essere riutilizzato nella produzione di nuovi pneumatici;
- **Gas condensabili:** per condensazione degli stessi si ottiene un Tyre Pyrolysis Oil grezzo (TPO).;
- **Gas non condensabili.**



Le ricerche e la sperimentazione sull'uso di questo tipo di combustibile sono ancora molto limitate, e non si dispone quindi di dati affidabili riguardo le sue prestazioni in ambito aeronautico.



2020

- Jet A-1: 0,54 \$/L
- AJF: 0,96-1,45 \$/L

Post pandemia COVID-19

- Jet A-1~ 0,54\$/L
- AJF~ 6,30 \$/L

Il futuro sviluppo degli AJF è principalmente legato alle prospettive di guadagno, più che ad ideali ecologisti.

Il valore chiave da considerare è il prezzo minimo di vendita (MSP): il carburante con il MSP più basso tra AJF e il JF convenzionale avrà il chiaro vantaggio economico.

ESEMPIO: AJF derivato dall'olio vegetale tramite il percorso HEFA

- Costo materia prima = 0,546\$/kg
- MSP = 1,37 \$/
- Costo JF = 0,42-1,28 \$/kg.

AJF non economicamente conveniente

Ipoteticamente:

- Costo delle materie prime in riduzione
- MSP~1,22 \$/kg
- Fluttuazione prezzo carburanti fossili~1,5 \$/kg

AJF economicamente conveniente

Le soluzioni tecnologiche presentano molte opportunità di sviluppo, seppur nel lungo periodo, e non senza alcuni rilevanti fattori da considerare.

In sintesi:

OPPORTUNITÀ

- Aumento delle emissioni e della domanda di carburante per aeromobili;
- Biocarburanti come fonte praticabile di energia alternativa;
- Fluttuazione di costo e variazione di disponibilità dei combustibili fossili;
- Desiderio di indipendenza energetica;
- Potenziale per crescita economica;
- Commercializzazione di sottoprodotti;
- Calo dei costi di produzione.

CRITICITÀ

- Alti costi di produzione;
- Disponibilità di materie prime;
- Regolamentazioni stringenti;
- Rischio del capitale investito;
- Mancanza di investimenti nel settore;
- Bassi costi dei combustibili fossili;
- Mancanza di infrastrutture;
- Competizione tra diversi AJF.

- [1]: S. Farooqui, A.Sinha, A.Ray; «Advanced Biofuel Technologies: present status, challenges and future prospects»; Elsevier, 2022.
- [2]: A. Gunerhan, O. Altuntas, H. Caliskan; «Utilization of renewable and sustainable aviation biofuels from waste tyres for sustainable aviation transport sector»; Elsevier, 2023.
- [3]: . J.Yang, Z.Xin, Q. He, K.Corscadden, H.Niu; «An overview on performance characteristics of bio-jet fuels»; Elsevier, 2019.
- [4]: B. Gawron, T. Bialecki; «Impact of a Jet A-1/HEFA blend on the performance and emission characteristics of a miniature turbojet engine»; Springer, 2017.
- [5]: M.A. Rumizen; «Qualification of alternative jet fuels»; Frontiers, 2021.
- [6]: R. Mawhood, E. Gazis, S. de Jong, R. Hoefngels, R. Slade; «Production pathways for renewable jet fuel: a review of commercialization status and future prospects»; Wiley, 2016.
- [7]: «Initiative Towards Sustainable Kerosene for Aviation», 2017;
<https://cordis.europa.eu/article/id/159907-the-skys-the-limit-with-innovative-euproduced-jet-biofuel/it>.
- [8]: L. Starck, L. Pidol, N. Jeuland, T. Chapus, P. Bogers, J. Bauldreay; «Production of Hydroprocessed Esters and Fatty Acids – Optimisation of Process Yield»; Hal, 2016.
- [9]: M. Lim, M.K. Luckert, F. Qiu; «Economic opportunities and challenges in biojet production: a literature review and analysis»; Elsevier, 2023.
- [10]: R. A. Zachariah, S. Sharma, V. Kumar; «Systematic review of passenger demand forecasting in aviation industry»; Springer, 2022.
- [11]: I. Gomèz Castro, C. Gutiérrez Antonio, A.G. Romero Izquierdo, M.M. May Vazquez, S. Hernandez; «“Intensified technologies for the production of triglyceride-based biofuels: Current status and future trends»»; Elsevier, 2023.
- [12]: T. Seiple, Y. Jiang, L.J. Snowden-Swan, N. Betzold, K.K. Ramasamy, C. Fuller; «Cost-Effective Opportunities to Produce Sustainable Aviation Fuel from Low-Cost Wastes in the U.S.»; ACS, 2023.
- [13]: E.I. Fitriyari, W. Won, J.J. Liu; «Sustainability assessment of biojet fuel produced from pyrolysis oil of woody biomass»; RSC, 2023
- [14]: P. Misra, A. Alvarez Majmutov, J. Chen; «Isomerization catalysts and technologies for biorefining: Opportunities for producing sustainable aviation fuels»; Elsevier, 2023.
- [15]: C.T. Chong, J.H. Ng; «Biojet Fuel in Aviation Applications»; Elsevier, 2021.
- [16]: H. Zhang, Y. Fang, M. Wang, L. Appels, Y. Deng; «Prospects and perspectives foster enhanced research on bio-aviation fuels»; Elsevier, 2020.
- [17]: R. Bhagwan, P. Habisreuther, N. Zarzalis, F. Turrini; «An Experimental Comparison of the Emissions Characteristics of Standard Jet A-1 and Synthetic Fuels»; Springer, 2014.
- [18]: M. Ajike Peters, C. Tondo Alves, J. Azubuike Onwudili; «A Review of Current and Emerging Production Technologies for Biomass-Derived Sustainable Aviation Fuels»; MDPI, 2023.
- [19]: C. J. Chuck, J. Donnelly; «The compatibility of potential bioderived fuels with Jet A-1 aviation kerosene»; Elsevier, 2014.
- [20]: S. Richter, M. Braun-Unkloff, T. Kathrotia, C. Naumann, T. Kick, N. Slavinskaya, U. Riedel; «Methods and tools for the characterisation of a generic jet fuel»; Springer, 2018.
- [21]: T. Amari, N. J. Themelis, I. K. Wernick; «Resource recovery from used rubber tires»; Elsevier, 1999.
- [22]: S. Boichenko, K. Lejd, A. Yakovlieva, and O. Vovk; «Comparative characteristics of low-temperature properties of jet fuels modified with bio-additives»; IOP, 2018.
- [23]: A. Gunerhan, O. Altuntas, H. Caliskan; «Utilization of renewable and sustainable aviation biofuels from waste tyres for sustainable aviation transport sector»; Elsevier, 2023.
- [24]: W. Han, D. Han, H. Chen; «Pyrolysis of Waste Tires: A Review»; MDPI, 2023.
- [25]: “Jet Fuel Monitor”; <https://www.iata.org/en/publications/economics/fuel-monitor/>.