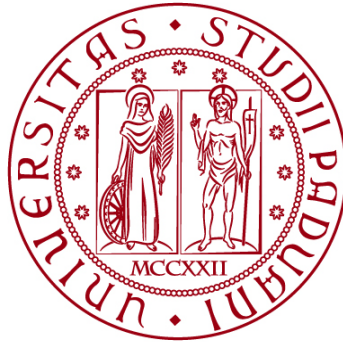


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di Laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio



TESI DI LAUREA

**CARBURANTI SOSTENIBILI PER L'AVIAZIONE
SECONDO IL REGOLAMENTO REFUELEU
AVIATION: ANALISI E PROSPETTIVE.**

Relatore: Chiar.mo Prof. **FILIPPO ZULIANI**

Correlatore: Ing. **GIULIO FACCIN**

Laureando: **MATTEO GIOFFREDA**

ANNO ACCADEMICO 2023-2024

ABSTRACT

L'attività di tesi si propone di esaminare il Regolamento Europeo 2023/2405 sulla garanzia di condizioni di parità per un trasporto aereo sostenibile (*ReFuelEU Aviation*), analizzando le sue implicazioni e gli obiettivi in merito ai carburanti sostenibili. Tale regolamento si propone di valorizzare l'uso dei "*Sustainable Aviation Fuels*" (*SAF*), imponendo soglie di utilizzo, istituendo un sistema di etichettatura ambientale e implementando l'obbligo di fornire report di monitoraggio riguardo l'uso di suddetti carburanti, in modo da uniformare il relativo mercato europeo destinato a un largo sviluppo nei prossimi anni.

L'indagine prosegue attraverso una dettagliata classificazione dei carburanti sostenibili certificati da ASTM D7566, esplora in particolare la sintesi dei carburanti di origine biologica e sintetica, esaminando le tecnologie coinvolte, i costi associati e gli impatti ambientali come evidenziati dalla letteratura scientifica. L'analisi è indirizzata ad individuare le soluzioni più efficaci per la diminuzione delle emissioni di gas ad effetto serra, che possono fornire una valida alternativa al cherosene tradizionale attualmente usato con preponderanza in aviazione.

Un aspetto cruciale sarà l'indagine sulla possibile richiesta futura di anidride carbonica (CO_2) associata alla filiera dell'e-cherosene, il carburante maggiormente adatto agli obiettivi sostenibili prefissati nel *ReFuelEU* dall'Unione. Risulterà interessante comprendere la richiesta stimata negli anni fino al 2050 del carburante sopracitato e le quantità di anidride carbonica necessarie a soddisfare tale richiesta, andando a modificare così il quadro emissivo di tale gas nell'ambito delle strategie di sviluppo dell'Unione Europea.

INDICE:

ABSTRACT	V
INTRODUZIONE.....	1
CAPITOLO 1	3
1.1 - VERSO IL REFUELEU AVIATION.....	3
1.2 - PROMOZIONE CARBURANTI SOSTENIBILI.....	6
1.3 - INCENTIVI NORMATIVI ED ETICHETTATURA AMBIENTALE	9
1.4 - MONITORAGGIO E REPORTISTICA	11
1.5 - FORMAZIONE DI UN MERCATO UNIFORME.....	15
CAPITOLO 2	17
2.1 - APPROCCIO METODOLOGICO	17
2.2 - CHEROSENE (JET-A1)	20
2.3 - FISCHER-TROPSCH (F-T).....	24
2.3.1 - BIOCARBURANTE (FT-SPK)	27
2.3.2 - E-CHEROSENE (PtL).....	31
2.4 - HEFA (HEFA-SPK)	36
2.5 - ALCOHOL TO JET (ATJ-SPK)	40
2.6 - ISO-PARAFFINE SINTETIZZATE (SIP).....	44
CAPITOLO 3	49
3.1 - RICHIESTA FUTURA DI E-CHEROSENE	49
3.2 - RELAZIONE TRA ANIDRIDE CARBONICA ED E-CHEROSENE ...	51
CONCLUSIONE	55
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	57
RIFERIMENTI SITOGRAFICI	59

INTRODUZIONE

Il presente elaborato di tesi si propone di trattare l'analisi tecnica e legislativa relativa allo studio dei carburanti sostenibili per l'aviazione detti "*Sustainable Aviation Fuels*" (*SAF*). Essi, in seguito alla pubblicazione del Regolamento Europeo 2023/2405 *ReFuelEU Aviation*, ricoprono un ruolo fondamentale all'interno dell'obiettivo europeo di decarbonizzare questo settore altamente emissivo.

L'obiettivo del documento è l'individuazione della tipologia di carburante più sostenibile dal punto di vista ambientale. A questo proposito, ogni *SAF* verrà analizzato singolarmente e, tramite lo studio della sua intera filiera di produzione, si punterà a trovare quello maggiormente adatto nell'abbattimento delle emissioni future.

A tale scopo, il Capitolo 1 mirerà ad esaminare il Regolamento *ReFuelEU Aviation*, analizzando nei vari sottocapitoli le motivazioni, i metodi e gli obiettivi che hanno portato la comunità europea a regolamentare questo settore. Grande risalto è dato all'imposizione di soglie minime e medie di utilizzo di tali carburanti sostenibili, qui inoltre si potrà notare come i carburanti sintetici vengano trattati separatamente, imponendosi con un ruolo centrale negli sviluppi annuali fino al 2050.

In successione, il Capitolo 2 analizzerà le tipologie di carburante, certificate dallo standard ASTM D7566, dal punto di vista strettamente tecnico. Ciò rappresenterà il corpo principale del documento, in cui, per ognuno dei *SAF* verranno studiate le materie prime necessarie alla realizzazione del *SAF*, le diverse fasi della sua filiera di produzione, le metodologie di produzione, i prodotti finali e i relativi costi associati.

A suddetta analisi si collegherà poi il Capitolo 3, in cui, per il *SAF* meno emissivo analizzato nel capitolo precedente, verranno ipotizzati i quantitativi richiesti in futuro in base all'incrocio di dati derivanti dalla letteratura e dal *ReFuelEU*.

Il fine ultimo sarà quello di valutare la stretta relazione che intercorre tra la quantità del carburante richiesta e l'anidride carbonica necessaria a soddisfarla, con stime quinquennali, cercando di trovare soluzioni tangibili relative al reperimento della CO_2 utile alla realizzazione di tale combustibile.

CAPITOLO 1

1.1 - VERSO IL REFUELEU AVIATION

Dalla metà del XIX secolo, con l'avvento dell'industrializzazione e lo sviluppo di nuovi mezzi di trasporto come le automobili, gli aerei e le navi a motore, le emissioni in atmosfera di gas legati a queste innovazioni sono notevolmente aumentate. La conseguenza principale di questo incremento nel quadro percentuale dei livelli gassosi in atmosfera è l'innalzamento della temperatura media del globo terrestre, dovuto ai “*Green House Gases*” (*GHG*) ovvero i gas a effetto serra. Questi, hanno la caratteristica di trattenere il calore riflesso dalla superficie all'interno dell'atmosfera; i principali che fanno parte di questa categoria sono: il vapore acqueo (H_2O), l'anidride carbonica (CO_2), il protossido di azoto (N_2O), il metano (CH_4) e l'esafluoruro di zolfo (SF_6).

Nell' “*AR6*”, sesto rapporto emanato dall' IPCC nel 2022 con l'obiettivo di studiare e trovare soluzioni per la mitigazione dei cambiamenti climatici, è stato calcolato che nel periodo compreso tra il 2011 e il 2020, la temperatura terrestre si è innalzata di 1.1 °C rispetto a quella di fine XIX secolo, tra il 1850 e il 1900.

Le cause naturali, come ad esempio le eruzioni vulcaniche, capaci di influenzare la temperatura del globo su scale temporali brevi, non hanno agito in modo significativo dall'era preindustriale ad oggi; ne consegue che la causa di questo cambiamento è da individuare nel reiterarsi delle attività umane. Conseguentemente a questo, l'innalzamento della temperatura media implica il sempre più frequente verificarsi di eventi climatici estremi: ondate di calore, uragani, siccità e precipitazioni intense, in nuove aree del mondo e con diverse tempistiche rispetto a ciò che ci si aspetta normalmente.

Focalizzandoci ora sulle cause, ovvero sulle concentrazioni di gas in atmosfera, le ingenti quantità di anidride carbonica (CO_2) rilasciate rappresentano uno dei principali problemi di livello ambientale che il pianeta sta riscontrando.

Secondo il rapporto dell'IPCC sopra citato, le concentrazioni di anidride carbonica sono le più alte degli ultimi due milioni di anni; si è arrivati a registrare una concentrazione di CO_2 pari a 410 ppm (parti per milione) nel 2019 rispetto ai 290 ca. ppm del 1850- In particolare, nell'anno 2022, come riportato dall' “*International energy agency*” (*IEA*), “*CO2 Emissions in 2022 – Analysis*”, le emissioni globali di anidride carbonica hanno

raggiunto un nuovo record, pari a 36.8 Gt (miliardi di tonnellate), dovuto al ritorno a regime di tutte le attività, in seguito alla pandemia globale di Covid-19, per cui molti settori economici -industria, trasporti e turismo- hanno subito grandi rallentamenti e defezioni.

In risposta a questa situazione l'Unione Europea ha emanato un insieme di proposte volte a rivedere e aggiornare le normative precedenti, in modo tale da mitigare tramite azioni mirate i continui cambiamenti climatici dovuti alle suddette alte concentrazioni di gas. Si tratta del pacchetto "*Fit for 55*" con cui l'UE si impegna a garantire politiche in linea con gli obiettivi climatici concordati dal Consiglio e dal Parlamento europeo. Propriamente questo pacchetto mira a ridurre le emissioni nette di gas a effetto serra (GHG) di almeno il 55% entro il 2030, abbracciando vari ambiti:

- promozione e sviluppo delle fonti di energia rinnovabili;
- attività di efficientamento energetico;
- restrizione di norme sull'emissione di CO_2 per auto e furgoni;
- riduzione delle emissioni di metano nel settore dell'energia;
- sviluppo di carburanti sostenibili per l'aviazione.

In questo elaborato verrà analizzato proprio quest'ultimo aspetto.

Secondo l'"*Air Transport Action Group*" (ATAG) nel 2019 le compagnie aeree mondiali hanno trasportato 4.5 miliardi di passeggeri su 46.8 milioni di voli, emettendo un totale di 914 milioni di tonnellate di anidride carbonica; secondo le previsioni entro il 2037 i passeggeri saranno 8.2 miliardi con un inevitabile ulteriore incremento di questi dati. Le emissioni dovute al traffico aereo rappresentano circa il 2.1% di tutte le emissioni di CO_2 indotte dall'uomo. In proporzione esse sono appena il 12% di tutte quelle dovute ai trasporti, dato molto inferiore se confrontato con il 74% dovuto al traffico stradale, e perciò, questo settore potrebbe risultare poco incidente nel complessivo, ma in realtà non è così. Ogni passeggero che usa l'aviazione come tipo di trasporto produce 282 gCO_2 per km, ovvero più del quadruplo di quanto lo stesso passeggero produrrebbe viaggiando su una normale auto (60 gCO_2 per km ca.). Di conseguenza, basandosi sulle stime future, è importante operare nel settore dell'aviazione in materia di sostenibilità, rendendo il trasporto aereo più pulito a livello di emissioni.

A tal fine, il 31 ottobre 2023 sulla Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea, come anticipato da un comunicato stampa del consiglio europeo del 9 ottobre, viene pubblicato

il regolamento “*ReFuelEU Aviation*” stipulato il giorno 18 dello stesso mese a Strasburgo. Tale regolamento è atto a decarbonizzare il settore dell’aviazione, ed è indirizzato agli operatori aerei, ai fornitori di carburanti, agli aeroporti dell’Unione e ai rispettivi enti di gestione. Il principale obiettivo di questo regolamento è aumentare rispettivamente la domanda e l’offerta dei “*Sustainable Aviation Fuels*” (*SAF*) ovvero i carburanti sostenibili per l’aviazione la cui principale peculiarità è la capacità di offrire le stesse prestazioni dei tradizionali, ma con un’emissione quantitativa di anidride carbonica nettamente inferiore; l’obiettivo è quindi quello di abbassare notevolmente questa soglia, garantendo equità e parità all’interno del mercato europeo dei combustibili per aviazione.

1.2 - PROMOZIONE CARBURANTI SOSTENIBILI

Attualmente il combustibile più usato in aviazione è il cherosene, che dal punto di vista della composizione tecnica è una miscela derivata dal petrolio greggio con l'aggiunta di idrocarburi e additivi; ciò lo rende dipendente dall'estrazione dai pozzi petroliferi, da cui vengono prodotte anche le miscele di carburante per auto.

È calcolato che questo tipo di miscela usata per il funzionamento dell'aeromobile produce $3.15 \text{ kgCO}_2/\text{l}$ rappresentando una grande fonte di emissione che il regolamento vuole abbattere.

I *SAF*, quindi, sono una valida alternativa grazie alle loro basse emissioni e sostenibili per l'ambiente, usando materie prime di riciclo, ovvero materiali derivanti da fonti utilizzate e scartate e successivamente raccolte, venendo trattate e rese efficienti al loro riutilizzo. Questo riesce a limitare l'uso di materie prime vergini preservando il pianeta e favorendo l'economia circolare.

Addentrandosi ora nello studio tecnico del regolamento, si nota come l'Unione Europea abbia voluto impostare un piano di obiettivi da seguire, per monitorare e regolare con precisione l'incremento dell'uso dei *SAF*.

Questa regolamentazione è trattata nell'Articolo 4 del *ReFuelEU*, in cui, nel comma uno, è imposto l'obbligo ai fornitori di carburante di assicurare agli operatori aerei la disponibilità di un carburante per l'aviazione conforme alle specifiche indicate nell'Allegato I.

L'Allegato sopracitato è di importanza centrale nell'applicazione del regolamento; esso, infatti, focalizza l'attenzione sulle quote minime di carburante sostenibile per l'aviazione che devono essere rispettate con scadenze quinquennali.

In seguito, si riporta una tabella riassuntiva delle percentuali di *SAF* da implementare, con la rispettiva pianificazione temporale:

Tabella 1.1. Tabella riassuntiva delle quote di SAF per anno, con SAF min è indicata la quota minima di SAF da rispettare, con SAFS med la quota media di SAF sintetico da rispettare e con SAFS min la quota minima di SAF sintetico da rispettare.

ANNO	2025	2030	2031	2032	2033	2034
SAF min	2.0%	6.0%	6.0%	6.0%	6.0%	6.0%
SAFS med		1.2%	1.2%	2.0%	2.0%	2.0%
SAFS min		0.7%	0.7%	1.2%	1.2%	2.0%
ANNO	2035	2040	2045	2050		
SAF min	20.0%	34.0%	42.0%	70.0%		
SAFS min	5.0%	10.0%	15.0%	35.0%		

Nella definizione di queste percentuali, si nota come sia fatta una precisazione sui tipi di SAF. È specificata una quota da rispettare relativa ai SAF sintetici, questo perché, come si illustrerà nel proseguo del progetto, i SAF di tipo sintetico sono caratterizzati da un'elevata performance ambientale, diminuendo di quasi il 100% l'emissione di anidride carbonica, rendendoli così più efficaci.

Inoltre, il raggiungimento degli obiettivi sopracitati, si ritiene soddisfatto anche nel caso in cui le quote minime siano raggiunte con l'utilizzo di idrogeno rinnovabile per l'aviazione e carburanti per l'aviazione a basse emissioni di carbonio. A queste forme di rifornimento alternative, in particolare l'idrogeno, il *ReFuelEU* dedica l'intero articolo 7. Questo articolo, infatti, mira a sviluppare in maniera costante per gli operatori aerei la facilità di approvvigionamento di idrogeno rinnovabile e elettricità, fondamentali per l'efficienza dei voli. Per fare ciò gli aeroporti e i relativi enti di gestione si impegneranno nell'ampliare siti, punti di stoccaggio e rifornimento di suddette forme di carburante, informando entro il 31 marzo 2025 e successivamente una volta ogni due anni l'autorità competente e l'Agenzia sullo stato di avanzamento dei progetti.

Correlata all'imposizione del rispetto delle percentuali sopra indicate, il regolamento si impegna a incentivare uno sviluppo strutturale di tutto ciò che gravita intorno al mondo dei SAF. Con l'incremento nella produzione, nella vendita e nell'utilizzo di questi

carburanti il volume fisico di combustibile da gestire diventa considerevolmente maggiore con la conseguente necessità di ampliare i siti di stoccaggio negli aeroporti, costruendone di nuovi o modificando quelli già esistenti, di creare nuovi punti di rifornimento per gli aeromobili dedicati ai *SAF* e di migliorare l'efficienza della fornitura di carburante relazionando tra loro gli attori coinvolti: gli operatori aerei, gli enti di gestione degli aeroporti e i fornitori di carburante.

1.3 - INCENTIVI NORMATIVI ED ETICHETTATURA AMBIENTALE

Procedendo per conseguenze logiche nei temi toccati dal regolamento, si nota l'implementazione di un sistema di etichettatura ambientale mirato agli operatori aerei. Suddetto sistema è istituito per commercializzare maggiormente a livello pubblicitario i voli meno impattanti di una stessa rotta, in modo da invogliare il cliente passeggero a prediligere un operatore aereo più attento alle tematiche ambientali rispetto ad un altro; l'etichetta viene rilasciata, infatti, per dimostrare l'efficienza nella misurazione delle prestazioni ambientali dei voli.

Il conseguimento di questa etichetta è del tutto volontario, di conseguenza non c'è alcun obbligo che implica l'operatore a lavorare solo in caso di possesso della suddetta; nel caso in cui l'operatore voglia acquisire questa etichetta dovrà pagare un onere all'Agenzia, la quale destinerà questa somma per coprire le spese di supervisione e controllo dei dati forniti dall'operatore.

L'etichetta ha validità annuale, perciò periodicamente, nel caso l'operatore lo desideri, essa andrà riacquistata previa dimostrazione di conformità alle apposite specifiche; inoltre, l'operatore aereo è obbligato a mostrare al cliente il suo periodo di validità, evitando qualsiasi tipo di informazione errata.

Entrando nelle specifiche tecniche che l'etichetta conferma, si riscontra che essa è rilasciata a norma dell'articolo 14 del *ReFuelEU*, e che comprende una serie di informazioni precise riguardo uno o più voli:

- l'impronta di carbonio prevista per passeggero, espressa con il sistema metrico decimale, ad esempio con l'uso di chilogrammi di CO_2 per passeggero, per il periodo in cui l'etichetta è valida;
- l'efficienza, in termini di CO_2 per chilometro, espressa con il sistema metrico decimale, ad esempio con l'uso di CO_2 per passeggero per chilometro, per il periodo in cui l'etichetta è valida.

Le specifiche sopra elencate (impronta di carbonio ed efficienza in termini di CO_2 per chilometro) sono calcolate dall’Agenzia usando una metodologia standardizzata basata sull’uso di dati scientifici e su informazioni fornite dagli operatori aerei in merito a:

- il tipo di aeromobile, il numero medio di passeggeri e merci, il coefficiente di riempimento medio per rotta e il periodo di tempo;
- prestazioni del combustibile usato, con parametri come quantitativo totale di *SAF*, percentuale di *SAF* rispetto al totale, la loro qualità, l’origine, la composizione e le loro emissioni durante l’intero ciclo di vita (*LCA*).

Periodicamente l’Agenzia riesamina i parametri forniti dall’operatore aereo; in presenza di irregolarità o non conformità, essa è tenuta a revocare o cambiare l’etichetta, in seguito alla possibilità di ascolto dell’operatore aereo notificato di tale cambiamento.

In conclusione, come trattato nel comma 12, l’ultimo dell’articolo 14 in cui sono indicate le specifiche riguardo l’etichettatura ambientale, entro il 1° luglio 2027 la Commissione si impegna a valutare ed operare aggiornamenti riguardo questo tipo di sistema; l’obiettivo è quello di arrivare a istituire un sistema di etichettatura ambientale obbligatorio comprendente tutti gli aspetti prestazionali dei voli con particolare riguardo alla decarbonizzazione delle emissioni prodotte da essi.

Questo potrebbe essere un ulteriore segnale che l’Unione Europea manda al mondo della sostenibilità ambientale, rafforzando in maniera evidente la volontà di regolarizzare le emissioni obbligando gli operatori aerei a rispettare determinate caratteristiche; inoltre, intende implicitamente consigliare il cliente a prediligere sistemi di trasporto aereo più efficienti dal punto di vista prestazionale ambientale, in modo da agire in materia di decarbonizzazione sia dal fronte degli acquirenti, come lo sono i passeggeri, sia da quello dei venditori, ovvero gli operatori aerei.

1.4 - MONITORAGGIO E REPORTISTICA

Assicurare l'osservanza delle norme specificate e stabilite nel regolamento è un obiettivo da perseguire.

Questo tema è estremamente importante per l'esecuzione e l'attuazione positiva del *ReFuelEU*. L'intero articolo 11, infatti, affronta l'istituzione e le modalità in cui deve operare l'autorità competente; essa è designata e scelta da ogni Stato membro e ha funzioni ben precise.

Suddetta autorità può non essere singola, ma molteplice ed è responsabile dell'applicazione del regolamento e dell'assegnazione di sanzioni pecuniarie a tutti gli attori che entrano in gioco: operatori aerei, fornitori di carburante e aeroporti dell'Unione o loro enti di gestione.

L'autorità competente, quindi, applica un sistema di monitoraggio di varie informazioni che le parti prese in causa e precedentemente indicate sono tenute a comunicare, non a caso nel regolamento sono presenti vari articoli che esplicitano gli obblighi a cui gli attori devono sottostare e il modo in cui devono attuare questo tipo di comunicazione.

Gli operatori aerei, come indicato nell'articolo 8, hanno l'obbligo di comunicare entro il 31 marzo di ogni anno, a partire dal 2025, all'Agenzia e all'autorità competente, una serie di informazioni:

- il quantitativo in tonnellate, di carburante per l'aviazione caricato in ogni aeroporto dell'Unione;
- il fabbisogno annuo di carburante per aviazione, espresso in tonnellate;
- il quantitativo totale, espresso in tonnellate, di *SAF* acquistato da ogni fornitore di carburante per operare i loro voli con partenza da aeroporti dell'Unione;
- per ogni acquisto di *SAF* inoltre è obbligatorio riportare la quantità acquistata in tonnellate, il suo processo di conversione, le sue materie prime utilizzate e le sue emissioni durante il ciclo di vita;
- il numero di voli e le ore per ognuno che sono state effettuate durante l'anno.

Il regolamento inoltre mette a disposizione nell'allegato II una tabella contenente le specifiche sopracitate, in modo da rendere più agevole e comprensiva la comunicazione e la lettura dei dati sia per l'operatore aereo che per l'Agenzia o l'autorità competente.

I fornitori di carburante per l'aviazione, come gli operatori aerei, hanno degli obblighi paralleli a cui devono sottostare; essi ogni anno, entro il 14 febbraio a partire dal 2025, devono inserire nella banca dati dell'Unione una serie di informazioni e dati:

- il quantitativo, in tonnellate, di carburante per l'aviazione messo a disposizione in ogni aeroporto dell'Unione;
- il quantitativo di *SAF*, espresso in tonnellate, fornito a ciascun aeroporto dell'Unione;
- le caratteristiche, l'origine delle materie prime utilizzate nella produzione, il processo di conversione e le emissioni derivanti dall'intero ciclo di vita, di ogni tipo di *SAF*;
- il contenuto energetico di ogni *CAF* e *SAF* fornito ad ogni aeroporto dell'Unione.

Gli Stati membri e l'autorità competente hanno pieno accesso alla banca dati, in modo tale da poter svolgere in totale libertà e precisione i controlli necessari e in caso di necessità assegnare sanzioni pecuniarie.

Questo tipo di comunicazione, resa obbligatoria ad operatori aerei e fornitori di carburante, risulta incredibilmente utile nel monitoraggio dell'applicazione corretta degli obblighi che il regolamento prevede; induce implicitamente allo sviluppo nell'uso dei *SAF* nelle quantità elencate nella tabella 1.1 e inoltre crea un ampio quadro di controllo relativo ai carburanti sostenibili maggiormente usati, indica le materie prime maggiormente efficaci e i processi di conversione con le relative emissioni durante il ciclo di vita. Risulta quindi essere un punto di partenza nell'eventualità di problematiche legate a qualsiasi fase, dalla produzione, trasformazione e utilizzo dei *SAF*, fornendo informazioni su come meglio procedere per implementare maggiormente e con finalità più efficaci questi tipi di carburante.

Ultima, ma non per importanza, nell'articolo 13 viene espresso l'obbligo all'Agenzia di pubblicare annualmente una relazione riassuntiva da trasmettere al Parlamento Europeo e al Consiglio, in modo da inglobare tutte le comunicazioni sopraelencate degli operatori aerei e dei fornitori di carburante. Questa relazione, compilata dall'Agenzia con l'aiuto degli Stati membri contiene:

- Il quantitativo aggregato di carburante per aviazione acquistato dagli operatori aerei per tutti i voli operati da e per aeroporti dell'Unione;
- Il quantitativo aggregato di *SAF* normali e sintetici, distinti per Stato membro e aeroporto dell'Unione; questa relazione deve contenere: il quantitativo e il tipo di materie prime usate per produrli e l'analisi delle capacità di rispettare le quote indicate nell'allegato I per i fornitori di carburante;
- Se possibile, il report delle quantità di *SAF* fornito nei paesi terzi con cui l'Unione ha stretto un rapporto di fornitura;
- Gli andamenti del mercato dei carburanti specificando: informazioni sui prezzi, specifiche nella produzione e nell'uso dei carburanti sostenibili per l'aviazione nell'Unione, per ogni Stato membro e per stati terzi con cui si hanno rapporti di fornitura o volo e infine l'evoluzione del divario dei prezzi tra carburanti sostenibili e convenzionali per l'aviazione;
- Lo stato di conformità, agli obblighi imposti dal regolamento, di ogni operatore aereo e fornitore di carburante;
- L'origine e le caratteristiche, comprese quelle di sostenibilità dell'idrogeno per l'aviazione, dei carburanti sostenibili per l'aviazione acquistati dagli operatori aerei per tutti voli in partenza da aeroporti dell'Unione;
- Il tenore medio dei naftaleni e degli aromatici in percentuale di volume e la percentuale in massa di zolfo per i carburanti per l'aviazione forniti per aeroporto e per l'intera Unione.

Quindi il regolamento, tramite questi obblighi, comunicazioni e relazioni si impegna a monitorare costantemente l'andamento dell'uso di *CAF* e *SAF* concentrandosi su ogni ambito che li riguarda, le quote percentuali, il quantitativo in tonnellate, l'uso di materie prime con le relative caratteristiche e le emissioni durante l'intero ciclo di vita. Questo serve a formare un report annuale, sempre aggiornato, che possa fornire informazioni sugli ambiti da migliorare o modificare e su quelli in cui investire maggiormente in sviluppi tecnici ed economici.

1.5 - FORMAZIONE DI UN MERCATO UNIFORME

Grazie alle stime effettuate dall' *ICAO* acronimo di "*International Civil Aviation Organisation*", la più importante organizzazione che tratta l'aviazione civile a livello internazionale, il trasporto aereo in seguito alla pandemia di COVID-19 subirà una crescita annuale pari al 3.1%, per il trasporto passeggeri, e 2.4% per il trasporto merci, di conseguenza esso costituirà un florido mercato da regolamentare e calibrare per evitare cattivi andamenti e speculazioni.

I carburanti per l'aviazione, sia quelli sostenibili che quelli comuni, sono soggetti a esenzione fiscale e perciò risultano molto sensibili per il prezzo di vendita.

Nel quadro europeo potrebbero verificarsi scenari eterogenei, in cui ogni aeroporto e fornitore di carburante scelga autonomamente il prezzo di vendita inducendo gli operatori aerei a intraprendere strategie sconsigliabili per risparmiare.

A tal fine il regolamento si impegna su molti fronti per uniformare e regolarizzare il mercato pur mantenendo come obiettivo principale l'operare una decarbonizzazione di questo settore. In particolare, la forzata introduzione di quote precise di utilizzo di *SAF* introdurrà un aumento di spesa per gli operatori aerei, in quanto attualmente tali tecnologie comportano costi elevati di produzione e quindi costi elevati di vendita e acquisto rispetto ai carburanti convenzionali; ciò rappresenterà un aumento di competitività tra gli Stati membri, aeroporti e fornitori dell'Unione che invece devono puntare a uno sviluppo graduale e omogeneo del mercato.

Il *ReFuelEU*, quindi, uniforma tramite norme rigorose il mercato, cercando di ampliare, senza conseguenze di competitività, l'uso e la fornitura di *SAF* nell'Unione. Esso particolarmente vuole dimensionare il più possibile la pratica del cosiddetto "*tankering*" ovvero il rifornimento dell'aeromobile con una quantità di carburante superiore a quella richiesta strettamente per la copertura del volo. Questa operazione permetterebbe agli operatori aerei di usufruire e di rifornirsi di un combustibile venduto a un prezzo inferiore, sfruttando così un determinato aeroporto e fornitore che implica un grande risparmio economico. In realtà il "*tankering*" ha dei risvolti negativi sia a livello economico che ambientale.

Economicamente si formano dei punti di rifornimento prediletti dagli operatori, creando una grande eterogeneità e una predominanza nell'attuazione di certe rotte piuttosto che altre, formando un'élite di aeroporti e fornitori preferiti che di conseguenza vedranno aumentare i loro profitti.

Dal punto di vista ambientale, l'aeromobile che viaggia con un peso elevato dovuto a un alto volume di carburante caricato, non necessario al completamento della singola tratta, inquina di più e perciò, gli sforzi indotti nella decarbonizzazione di questo settore si vanificherebbero.

Per scongiurare ciò l'Unione tramite il regolamento si impegna a uniformare i prezzi di fornitura di carburante nell'intero territorio di giurisdizione e di conseguenza evitare pratiche come il "*tankering*" che comprometterebbero il mercato e la sostenibilità ambientale.

CAPITOLO 2

2.1 - APPROCCIO METODOLOGICO

Il *ReFuelEU Aviation* si presenta quindi come un regolamento deciso a implementare nell'uso comune europeo la vendita e l'utilizzo dei *SAF*.

Diventa quindi fondamentale analizzare queste nuove forme di carburanti definiti “*drop-in*” ovvero, come indicato nella considerazione iniziale numero 9 del regolamento, liquidi adatti al miscelamento con carburante usato convenzionalmente nell'aviazione (cherosene), senza la necessità di adattare le strutture meccaniche di combustione presenti negli aeromobili e quindi con esse compatibili, diventando un vantaggio sia dal punto di vista tecnico-strutturale, sia da quello ambientale grazie al loro potere decarbonizzante.

Il capitolo in questione sarà centrato sullo studio dettagliato di questi nuovi carburanti, si analizzeranno nel particolare i *SAF* principali certificati e conformi allo standard ASTM D7566: “*Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons*”.

Facendo un elenco iniziale riguardante i combustibili presenti in questa specifica, verrà trattato:

- Cherosene tradizionale o più precisamente Jet-A1, il carburante usato convenzionalmente dalla maggior parte delle compagnie aeree esistenti;
- Cherosene sintetico paraffinico idro-processato Fischer-Tropsch (FT-SPK), di questo verrà analizzata la tecnologia che produce il biocombustibile dal riciclo di materie biologiche e la tecnologia “*Power to Liquids*” (*PtL*) che sfrutta prodotti rinnovabili e sostenibili (CO_2 da cattura atmosferica, H_2 da elettrolisi dell'acqua ed energia elettrica da fonti rinnovabili);
- Cherosene sintetico paraffinico sintetizzato da esteri e acidi grassi idro-processati (HEFA-SPK);
- Cherosene sintetico paraffinico alcohol-to-jet (ATJ-SPK);
- Iso-paraffine sintetizzate da zuccheri fermentati idro-processati (SIP).

Per ognuno dei combustibili sopraelencati si analizzerà con precisione ogni aspetto che li riguarda nel seguente ordine:

- **MATERIE PRIME USATE:** in questa sezione si elencheranno le componenti usate per la sintesi finale del combustibile finale;
- **STUDIO LCA DELLE FASI DELLA FILIERA DI PRODUZIONE DEL SAF:** per ognuna delle componenti iniziali necessarie alla realizzazione del *SAF*, si analizzeranno gli impatti che ne derivano, in emissione di gCO_2eq/MJ (grammi di anidride carbonica equivalente su Joule), ciò serve a standardizzare le emissioni di biossido di carbonio derivanti dalla combustione di una quantità specifica di energia espressa in mega-Joule (*MJ*). Inoltre, la CO_2 , è considerata equivalente (CO_2eq), in quanto vengono conteggiate le emissioni di altri gas serra (*GHG*), come ad esempio il metano (CH_4), l'ossido nitroso (N_2O) e l'esafluoruro di zolfo (SF_6) convertite in anidride carbonica, definita appunto equivalente. Questa analisi risulta necessaria e di centrale importanza nel presente elaborato, per conoscere quanto il carburante è efficiente dal punto di vista ambientale, capendo la potenzialità di decarbonizzazione che esso possiede. L'operazione precedentemente descritta fa parte del processo di studio del ciclo di vita, conosciuta internazionalmente come "*Life Cycle Assessment*" (*LCA*), in cui ogni fase del processo produttivo è analizzata per avere una visione più dettagliata dell'insieme; in particolare, nel presente documento, è affrontato esclusivamente il problema del "*climate change*" relativo alle materie prime usate nella produzione del combustibile, individuando per ognuna, un valore della sua impronta carbonica durante la filiera di produzione e dell'uso del *SAF*. Inoltre, l'*ICAO* per regolarizzare questo studio ha concordato l'utilizzo della metodologia *CORSIA* "*Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*" in modo da uniformare il più possibile i dati registrati. Si noterà che la voce corrispondente alla combustione del *SAF*, ai fini della rendicontazione, nella maggior parte dei dati forniti sarà

pari a $0.0 \text{ gCO}_2\text{eq/MJ}$. Questo accade nelle materie prime derivate da biomassa, in quanto, viene registrato un bilancio tra il carbonio assorbito durante la fotosintesi delle biomasse stesse e l'emissione di CO_2 durante la fase di combustione rendendolo in questa sezione nullo. L'unico caso in cui questa fase produce un'emissione diversa da zero è quella dei rifiuti solidi urbani con contenuto di carbonio non biogenico pari al 40% (RSU 40% NBC) in cui, nella fase di combustione, vengono emessi $29.3 \text{ gCO}_2\text{eq/MJ}$ essendo una materia prima non corrispondente a biomassa.

Un discorso differente è fatto per la tecnologia “*Power-to-Liquids*” per la produzione di e-cherosene, in cui la fase di combustione e il reperimento delle materie prime, rappresentato dall' assorbimento di anidride carbonica dall'atmosfera, assumono valori e significati diversi rispetto a quelli delle altre tecnologie di produzione di SAF;

- SPIEGAZIONE TECNICA DEL PROCESSO: ogni carburante è prodotto attraverso specifiche fasi fondamentali alla sintesi del carburante stesso. Questa sezione, quindi, si occupa di chiarire nel modo più completo ed esauriente possibile in che modo è materialmente realizzato il SAF;
- PRODOTTI FINALI: in seguito allo studio del processo di sintesi del carburante, la sezione in questione è mirata nell'analisi del prodotto finale dei processi; verranno elencate le proprietà specifiche relative a ogni SAF, dalla composizione alla densità, indicando anche i punti di congelamento, infiammabilità e la possibilità di miscelazione con il JET- A1. Informazioni utili a predisporre un confronto tra i vari carburanti grazie alle qualità che essi possiedono;
- COSTI ASSOCIATI: infine verranno indicati i prezzi di vendita relativi a ogni carburante, per capire le difficoltà economiche che il mercato potrà riscontrare in futuro, ponendo anche un'attenzione specifica sui costi associati all'intera filiera di produzione, dallo stoccaggio delle materie prime all'esecuzione materiale dei processi.

2.2 - CHEROSENE (JET-A1)

Prima di analizzare con esaustività la nuova frontiera dei carburanti sostenibili per l'aviazione è necessario capire, in modo altrettanto completo, quale combustibile è stato usato normalmente dalle compagnie aeree precedentemente gli obblighi imposti da regolamenti come il *ReFuelEU*. Inizialmente, quindi, si parlerà di cherosene tradizionale, ovvero il *CAF* più comunemente usato. La tipologia di cherosene maggiormente impiegato nel mondo, per i voli civili, prende il nome di JET-A1 e per questa ragione sarà oggetto di analisi nel documento in questione.

MATERIE PRIME:

La fonte da cui è prodotto questo tipo di carburante, determina la sua composizione, che in genere è una miscela di idrocarburi a catena lunga di circa 12-16 atomi, derivante dalla distillazione del petrolio. In proporzione contiene tra il 70-85% di paraffine, una parte di composti aromatici fino a un massimo di 25%, di naftaleni per circa il 3% e olefine per il 5% in volume; è formato nella sua integrità da una quantità di carbonio di circa l'85% sul totale e per la restante di idrogeno.

STUDIO LCA DELLE FASI DELLA FILIERA DI PRODUZIONE DEL SAF:

Nel caso in questione, fornire dati precisi sui valori *LCA* delle fasi della filiera di produzione del *SAF* diventa difficile, in quanto il JET-A1 può essere prodotto in molteplici modi. Di conseguenza si rende disponibile nella Tabella 2.1. lo studio condotto da Bauean *et al.* (2022) nell'articolo "*CORSIA Lower Carbon Aviation Fuels: An Assessment of the Greenhouse Gas Emission Reduction Potential*" in cui è fornita una serie di dati relativi alle emissioni dell'intera filiera del cherosene per aviazione, dalla produzione delle materie prime, fino alla combustione del prodotto finale.

TABELLA 2.1. *Quote di emissione, in gCO_2eq/MJ , delle fasi della filiera di produzione e dell'uso del cherosene per aviazione JET-A1, fonte: Bauean et al. (2022): "CORSA Lower Carbon Aviation Fuels: An Assessment of the Greenhouse Gas Emission Reduction Potential".*

FASI DELLA FILIERA	EMISSIONI in gCO_2eq/MJ
Produzione alla fonte	8.4
Trasporto al mercato	0.6
Raffinazione delle materie prime	6.0
Distribuzione nel mercato	0.8
Combustione	73.2
TOTALE	89.0

Come si potrà notare con più esaustività successivamente, il dato rilevato pari a 89.0 gCO_2eq/MJ inerente all'intero ciclo di vita del cherosene, rappresenta il valore più elevato delle emissioni di tutti i carburanti che verranno trattati. L'obiettivo della Comunità Europea, quindi, è proprio quello di abbassare il più possibile questo numero, tramite l'utilizzo dei SAF regolarizzati dal *ReFuelEU*.

SPIEGAZIONE TECNICA DEL PROCESSO:

La produzione del cherosene per aviazione parte, come tutte le fonti di carburante fossile, dall'estrazione di petrolio greggio dai giacimenti sotterranei con l'uso di trivellazioni e perforazioni. La maggior parte di queste riserve mondiali, circa il 50%, è concentrata in Medio Oriente, in paesi come Arabia Saudita, Iran, Iraq, Kuwait ed Emirati Arabi Uniti. Qui il "greggio" viene rilevato e successivamente trasportato nelle raffinerie di tutto il mondo per proseguire con la lavorazione.

Una volta arrivato in raffineria, il petrolio grezzo subisce una distillazione frazionata a una temperatura compresa tra i 150°C e 280°C al fine di separare le componenti di frazione pesante, da distillare nuovamente, da quelle leggere che costituiscono il vero e proprio cherosene, che continuerà nella filiera di produzione. Lo step successivo consiste nel perfezionamento di quest'ultimo, tramite trattamenti chimico-fisici; infatti, si punta a rimuovere impurità superflue e migliorare le proprietà specifiche del liquido. Qui avviene inoltre l'aggiunta di additivi chimici che caratterizzeranno il cherosene, ed è qui che viene delineato il JET-A1 diverso da tutti gli altri tipi di carburante per aviazione presentante

determinate proprietà di infiammabilità e punto di congelamento oggetto di successiva trattazione. Prima di commercializzare il prodotto finale, poi, vengono eseguiti controlli di qualità, sicurezza e conformità in modo che esso sia rispettabile delle specifiche indicate nell'ASTM D1655.

PRODOTTI FINALI:

Dal processo di produzione spiegato in precedenza viene ricavato un combustibile per aviazione denominato internazionalmente JET-A1; questo liquido è il più comunemente usato a livello mondiale per i voli civili destinati al trasporto pubblico di persone; è un liquido altamente infiammabile, spesso incolore, con un odore pungente simile all'acetone. Nella Tabella 2.2. sono elencate le principali proprietà che contraddistinguono questa tipologia di cherosene, raccolte dall'ASTM D1655 e riconosciute a livello internazionale.

TABELLA 2.2. *Proprietà specifiche relative al cherosene per aerei JET-A1, fonte: ASTM D1655.*

PROPRIETÀ JET-A1	VALORI
Densità a 15°C	Da 775 a 840 kg/m^3
Viscosità a -20°C	8.0 mm^2/s
Punto di infiammabilità	38°C
Punto di ebollizione	300°C
Punto di congelamento	-47°C

Dai valori sopra riportati, è da rilevare una temperatura di congelamento del liquido molto bassa pari a -47°C, necessaria per evitare il verificarsi di situazioni di pericolo in quota, dove le temperature sono molto rigide a causa dell'altitudine e il carburante rischierebbe di non essere bruciato regolarmente.

Per abbassare il punto di congelamento sono fondamentali gli additivi miscelati in fase di produzione ed è con questi che il cherosene si diversifica nelle seguenti tipologie specifiche di carburante per aerei: JET-A1 per i voli civili, JET-A usato dalla maggior parte di voli degli USA con punto di congelamento pari a -40°C e JP-8, cherosene usato prevalentemente per gli aeromobili a scopo militare che possiede caratteristiche specifiche atte all'uso in questo settore.

COSTI ASSOCIATI:

L'intero regolamento *ReFuelEU*, come analizzato nel corso del Capitolo 1 e con precisione nel Sottocapitolo 1.5, pone la sua attenzione maggiore sul fattore economico legato ai carburanti sostenibili per l'aviazione; di conseguenza diventa fondamentale capire il costo dei *CAF* e dei *SAF* nei limiti del possibile.

Il combustibile JET-A1, ad oggi, presenta un prezzo di vendita oscillante intorno ai 2000 €/ton. Ipotizzando l'uso di un aeromobile Boeing 737 per i voli con tratte a medio raggio, contenente un volume massimo di circa 26.000 litri di carburante, un pieno arriverebbe a costare 52.000 € ca.

2.3 - FISCHER-TROPSCH (F-T)

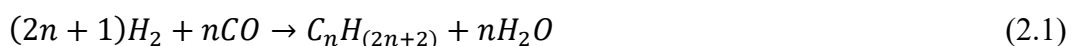
La prima tipologia di carburante sostenibile che verrà analizzata sarà il prodotto finale di un insieme di trattamenti e processi che prende il nome dagli scienziati Franz Fischer e Hans Tropsch, i primi a realizzarla nel 1925 presso l'istituto *Kaiser Wilhelm di Mülheim an der Ruhr*, vicino *Dortmund* in Germania.

Questo processo, chiamato quindi FISCHER-TROPSCH (F-T), consiste nella conversione di una miscela di monossido di carbonio (CO) e idrogeno (H_2) in idrocarburi liquidi.

La miscela sopracitata, tecnologicamente, prende il nome di “*syngas*”, ovvero il gas di sintesi prodotto dalla lavorazione di materie prime selezionate; è proprio qui, infatti, che avviene la distinzione tra le tipologie di carburante a F-T che verranno analizzate nel proseguo dell'elaborato. Se il “*syngas*” è ricavato dalla gassificazione della biomassa, allora verrà prodotto un biocarburante di origine biologica, se al contrario sarà creato interamente da elementi rinnovabili, porterà alla produzione di un carburante sintetico chiamato e-kerosene, sfruttando la tecnologia “*Power to Liquids*” (*PtL*) ovvero “dall'energia al carburante”.

Di conseguenza il processo F-T costituisce la fase principale del susseguirsi di reazioni, trattamenti e lavorazioni legati alla creazione fisica del carburante.

Chimicamente, la conversione del “*syngas*” in idrocarburo liquido segue la formula chimica:



In cui $n \in N$, ma di solito assume valori naturali compresi tra 10 e 20 ovvero caratteristici di idrocarburi a catena lunga.

Questo processo può essere sintetizzato nella successione di quattro fasi in seguito alla lavorazione e produzione del gas di sintesi:

1. RAFFINAZIONE DEL SYNGAS: La preparazione del gas di sintesi tramite una raffinazione diventa fondamentale per un suo buon utilizzo nelle fasi successive del processo. Diventa essenziale eliminare impurità che risulterebbero dannose al proseguo dei trattamenti, il gas quindi viene “pulito” di polveri, residui, azoto e composti di zolfo. In secondo luogo, in questa sezione diventa necessario regolare il rapporto tra monossido di carbonio

e idrogeno. Il tutto è bilanciato tramite la reazione di spostamento acqua-gas che permette di regolare con precisione le proporzioni tra CO , H_2 e CO_2 . Nello specifico dal “*syngas*” vengono rimosse sia l’anidride carbonica che l’acqua ottimizzando così la composizione del gas e ottimizzando al massimo il rendimento per il processo successivo di sintesi F-T.

2. SINTESI F-T: La reazione principale del processo, che ingloba la trasformazione di monossido di carbonio e idrogeno in idrocarburi, avviene all’interno di un reattore appositamente dedicato. Essendo questo processo caratterizzato da una grande esotermicità, la rimozione efficiente del calore è una caratteristica base ricercata nei reattori F-T. L’avanguardia relativa alle sperimentazioni in questo campo è rappresentata dai reattori a letto fluido e catalizzatori circolanti (*riser*), adatti ad operare fino a temperature di 340°C ca. con l’uso di catalizzatori alcalini specifici a ferro fuso mirati nella cattura del calore. Il prodotto derivante da questa fase del processo è il combustibile F-T “grezzo” che dovrà essere successivamente lavorato per essere commercializzato e usato.
3. ISOMERIZZAZIONE E RAMIFICAZIONE: La filiera del processo prosegue con un’ulteriore lavorazione operata sul combustibile ricavato dalla sintesi F-T. Il “grezzo” è caratterizzato da catene di idrocarburi lineari, nel particolare, chimicamente, essi sono n-alcani o n-paraffine e l’obiettivo di questa fase è formare catene di iso-alcani applicando una raffinazione, isomerizzando parzialmente gli idrocarburi. La finalità è quella di adattare il carburante alle specifiche indicate nell’ASTM D7566 riguardo il punto di congelamento relativo di ogni SAF. In questa sezione è inoltre possibile operare un trattamento di oligomerizzazione di idrocarburi più leggeri o, per quelli più pesanti, una reazione di “*selective cracking*” distruggendo particelle mirate dell’elemento, in modo da aumentare esponenzialmente la resa effettiva del carburante. È importante sottolineare però che il liquido ottenuto non è ancora il prodotto finale desiderato, ma una miscela di sottoprodotti diversi tra loro.

4. **DISTILLAZIONE:** Per ottenere il carburante desiderato, infine, quello F-T in uscita dalla fase di isomerizzazione e ramificazione necessita di una distillazione in base al numero di atomi di carbonio che la contraddistinguono. L'operazione sopracitata serve a ottenere singole frazioni di carburante come ad esempio: cherosene sintetico (e-kerosene), bio-cherosene, diesel, gas combustibile o nafta.

Dalla buona riuscita del processo F-T si riesce quindi a ricavare una frontiera sostenibile relativa ai carburanti usati in aviazione, in particolare, come anticipato in precedenza, essi possono essere di natura sintetica o biologica in base alle materie prime utilizzate nella produzione del “*syngas*”.

Nei sottocapitoli successivi l'attenzione sarà spostata esattamente su questo, analizzando nel dettaglio la differenza registrata in questi due tipi di *SAF*.

2.3.1 - BIOCARBURANTE (FT-SPK)

Una possibilità, relativa alla gamma di *SAF*, attualmente commercializzati internazionalmente è rappresentata dal carburante realizzato con il processo Fischer-Tropsch con l'utilizzo di materie prime di origine biologica. Il nome tecnico del prodotto finale è FT-SPK ovvero l'acronimo inglese di cherosene paraffinico sintetico realizzato tramite Fischer-Tropsch. Contestualizzando questo prodotto all'interno del *ReFuelEU*, si nota che esso, in base alle materie prime utilizzate, fa parte dei biocarburanti avanzati, definiti e illustrati nel secondo articolo del regolamento e con rimando alla direttiva 2018/2001 dell'UE, allegato IX parte A.

Si procede quindi, come illustrato nel Sottocapitolo 2.1, all'analisi specifica di questo tipo di combustibile per l'aviazione.

MATERIE PRIME:

Gli elementi di biomassa usata per la produzione dell'FT-SPK derivano tutti da materiali di scarto a cui si vuole dare un secondo fine utile, operando una sorta di riutilizzo nell'ambito industriale e dei trasporti. Le materie prime utilizzate per la fase antecedente il processo F-T, spiegato nel Sottocapitolo 2.3, ovvero la produzione del gas di sintesi "syngas" sono i seguenti: residui agricoli, residui forestali, rifiuti solidi urbani (RSU), colture legnose e colture energetiche erbacee.

STUDIO LCA DELLE FASI DELLA FILIERA DI PRODUZIONE DEL SAF:

Per operare questo tipo di analisi, si esaminerà l'appendice IX del report pubblicato dall'ICAO con titolo "*Report on the feasibility of a long-term aspirational goal (LTAG) for international civil aviation CO2 emission reductions*" che pone l'attenzione sulle emissioni di CO_2 derivanti dai *SAF*. I valori indicati in gCO_2eq/Mj rappresentano un'indicazione delle emissioni derivanti da ogni materia prima usata per creare il combustibile di origine biologica con la tecnologia Fischer-Tropsch.

Intrecciando questo studio con un suo parallelo fornito da Prussi *et al.* (2021) "*CORSIA: The first internationally adopted approach to calculate life cycle GHG emissions for aviation fuels*", in cui, per ogni materia prima è indicata l'emissione legata a

ogni fase della filiera che essi seguono (dalla loro produzione alla fonte, fino alla combustione del combustibile), si può ottenere un insieme di valori riassumibili nella Tabella 2.3.1.

TABELLA 2.3.1. Emissioni, in gCO_2eq/MJ , delle fasi della filiera di produzione e dell'uso di FT-SPK, da uno studio incrociato dei documenti: "Report on the feasibility of a long-term aspirational goal (LTAG) for international civil aviation CO2 emission reductions" e "CORSIA: The first internationally adopted approach to calculate life cycle GHG emissions for aviation fuels"; rispettivamente di ICAO e Prussi et al. (2021).

Materie prime per la sintesi di FT-SPK	Produzione alla fonte	Trasporto	Produzione in SAF	Trasporto del SAF	Combustione	Totale in gCO_2eq/MJ
RESIDUI AGRICOLI	3.5	3.5	0.2	0.5	0.0	7.7
RESIDUI FORESTALI	3.2	3.8	0.8	0.5	0.0	8.3
RSU (0% NBC)	4.3	0.2	0.0	0.7	0.0	5.2
RSU (40% NBC)	4.3	0.2	38.9	0.7	29.3	73.4
COLTURE LEGNOSE	7.1	3.1	1.3	0.7	0.0	12.2
COLTURE ENERGETICHE ERBACEE	7.1	2.2	0.4	0.7	0.0	10.4

Come si può notare dalla Tabella 2.3.1, il combustibile creato tramite il processo Fischer-Tropsch derivante dai rifiuti solidi urbani, con contenuto di carbonio non biogenico pari allo 0%, risulta essere la tipologia di SAF a F-T più preferibile, in quanto emette una quantità di gas pari a $5.2 gCO_2eq/MJ$. In contrasto a questo dato, il carburante prodotto con rifiuti solidi urbani con il 40% di carbonio non biogenico, si presenta come il meno sostenibile e quindi più impattante a livello ambientale, emettendo una quantità di anidride carbonica equivalente pari a $73.4 gCO_2eq/MJ$. Si nota che esso rimane, in ogni

caso, inferiore alla soglia di $89 \text{ gCO}_2\text{eq/MJ}$ del cherosene tradizionale definita precedentemente nel Sottocapitolo 2.2, e quindi in ogni caso vantaggiosa dal punto di vista ambientale.

SPIEGAZIONE TECNICA DEL PROCESSO:

In questa sezione si analizzerà la parte iniziale del processo di creazione del combustibile, ovvero la fase antecedente la raffinazione del “*syngas*” esaustivamente spiegata nel Sottocapitolo 2.3.

Di conseguenza, è importante capire come la materia prima venga trattata per formare il gas di sintesi.

Inizialmente il materiale viene pretrattato operando nell’ordine una vagliatura, una essiccazione e una torrefazione.

La vagliatura permette di sezionare la materia prima, operando una distinzione tra la biomassa di grandezza adeguata e quella inadeguata al proseguo dei trattamenti, questa selezione è utile a uniformizzare la dimensione delle particelle e rendere la successiva gassificazione efficace immediatamente.

L’essiccazione induce la materia prima selezionata a ridurre il suo contenuto di umidità di circa il 10-15%, ciò risulterà utile per un’alta resa del processo, ma in compenso riduce la quantità di idrogeno nel gas rendendolo leggermente inadatto alla sintesi F-T.

Infine, la torrefazione, converte la biomassa fresca in prodotto solido uniforme con un basso contenuto di umidità e alto potere calorifico. Questa operazione avviene in assenza di ossigeno, a pressione atmosferica ed a una temperatura compresa tra i 400 e 800 °C.

Finito il ciclo di pretrattamenti, la materia prima in formato solido e uniforme è pronta alla gassificazione in un reattore ad una temperatura di 850°C in cui la biomassa è bruciata con la conseguente formazione di un gas (“*syngas*”) che viene raccolto e poi trattato come già spiegato nel Sottocapitolo 2.3.

PRODOTTI FINALI:

Con la sintesi di Fischer-Tropsch, viene ricavato un *SAF* internazionalmente chiamato FT-SPK ovvero cherosene sintetico paraffinico prodotto tramite Fischer-Tropsch. Questo tipo di combustibile è indicato, nel regolamento *ReFuelEU*, come biocarburante avanzato e possiede delle specifiche proprietà indicate nella Tabella 2.3.2 e ricavate da ASTM D7566 23-b.

TABELLA 2.3.2. Valori indicati da ASTM D7566 23-b riguardo le proprietà specifiche di FT-SPK.

PROPRIETÀ FT-SPK	VALORI
Densità a 15°C	Da 730 a 770 kg/m ³
Punto di infiammabilità	38°C
Punto di ebollizione	300°C
Punto di congelamento	-40°C
Miscelazione con JET-A1	50%
<i>FRL: "Fuel readiness level"</i>	7

Nella Tabella 2.3.2 si nota che il punto di infiammabilità e il punto di ebollizione del biocarburante prodotto con Fischer-Tropsch coincidono con quelli di JET-A1, mentre la densità e il punto di congelamento risultano essere, seppur di poco, diversi.

L'*FRL: "Fuel readiness level"* invece corrisponde al livello di disponibilità del carburante in ambito commerciale; esso è calcolato su una scala da 1 (poco) a 10 (alto) per capire quanto il *SAF* in questione è usato e venduto a livello globale.

COSTI ASSOCIATI:

Attualmente non è definito un prezzo specifico per questo tipo di carburante, ma la media fornita riguardante i biocarburanti sostenibili per l'aviazione, compresi quelli prodotti col procedimento Fischer-Tropsch, presenta un prezzo di 3500 €/ton, inoltre Buller-diek *et al.* (2023) nell'articolo: "*Renewable fuel options for aviation – A System Wide comparison of Drop-In and non-Drop-In fuel options*" indicano un valore mediano di 39.5 €/Gj.

Di conseguenza il prezzo, come ci si poteva aspettare, è notevolmente maggiore rispetto a quello del JET-A1.

2.3.2 - E-CHEROSENE (PtL)

La seconda tipologia, di *SAF* ricavati tramite il processo Fischer-Tropsch è l'e-cherosene; a differenza di FT-SPK esso utilizza materiali altamente sostenibili, in modo da pareggiare il più possibile l'emissione di anidride carbonica con il suo assorbimento dall'atmosfera.

All'interno del regolamento *ReFuelEU* esso, è compreso nel raggruppamento dei carburanti sintetici per l'aviazione, ovvero i combustibili di origine non biologica, che derivano da materie prime rinnovabili diverse dalla biomassa.

Un sinonimo usato per indicare questo tipo di combustibile è "*Power-to-Liquid*" (*PtL*) ovvero la tecnologia specifica usata per ricavare il combustibile, letteralmente essa significa "dall'energia al liquido", specificando la qualità del carburante di essere prodotto partendo dall'uso di energia rinnovabile per ottenere una qualità di combustibile per l'aviazione funzionante e utilizzabile.

MATERIE PRIME:

Come anticipato in precedenza, l'e-cherosene ha la peculiarità di usare nel suo processo produttivo solamente elementi sostenibili; la formazione del gas di sintesi è derivata esclusivamente da poche ma essenziali materie prime:

- CO_2 di cattura atmosferica;
- Acqua da risorse sostenibili e non da risorse idriche fossili;
- Idrogeno ricavato tramite elettrolisi sostenibile dell'acqua.

Il tutto, usando esclusivamente energia da fonti rinnovabili come ad esempio energia solare, fotovoltaica, eolica e idroelettrica.

STUDIO LCA DELLE FASI DELLA FILIERA DI PRODUZIONE DEL SAF:

Per il tipo di tecnologia "*Power-to-Liquid*" l'analisi *LCA* delle singole fasi della filiera di produzione del carburante risulta più difficoltosa, nonostante ciò, grazie al documento, citato dall'*ICAO*, di Batteiger *et al.* (2022) "*Power-to-Liquids: a scalable and sustainable fuel supply perspective for aviation*" è fornito un dato complessivo riguardante l'emissione di CO_2eq in tutte le sezioni di produzione, dallo stoccaggio delle materie prime fino alla combustione del *SAF*.

Nell'articolo sopracitato è indicato un valore oscillante tra 5-10 gCO_2eq/MJ , dato decisamente inferiore rispetto agli 89 gCO_2eq/MJ del JET-A1 e consente di abbattere nettamente la soglia di emissioni derivanti dall'uso dei carburanti in aviazione.

Parallelamente, uno studio rilasciato dal dipartimento di Ingegneria Sostenibile dell'Istituto di Tecnologia Ambientale dell'Università di Berlino, condotto da Micheli *et al.* (2022) "*Life-Cycle Assessment of Power-to-Liquid Kerosene Produced from Renewable Electricity and CO₂ from Direct Air Capture in Germany*" ha fornito, per le varie categorie di produzione legate alla sintetizzazione di e-cherosene, dei valori di emissione derivanti dalla filiera del *PtL*.

Come riportato in precedenza nella sottocategoria relativa alle materie prime impiegate nella produzione di e-cherosene, l'idrogeno ricavato tramite elettrolisi dell'acqua e la sintesi di Fischer-Tropsch rappresentano un fattore centrale nella sintetizzazione di suddetto *SAF*. In particolare, nella rendicontazione delle emissioni legate al ciclo di vita della filiera, l'elettricità impiegata per svolgere queste operazioni deve essere di natura sostenibile per far sì che l'impatto ambientale dell'e-cherosene sia il più inferiore possibile. Di conseguenza, i dati forniti dallo studio in questione, si riferiscono alla filiera del *PtL* con l'uso di energia rinnovabile sotto forma di energia eolica ed energia fotovoltaica.

Per semplicità di lettura, si fornisce una tabella comprendente le varie fasi della filiera di produzione di e-cherosene con i relativi valori di emissione, usando come valore base una cattura atmosferica di anidride carbonica di 75 gCO_2eq/MJ , che nella rendicontazione assumerà valore negativo.

Le emissioni relative alla filiera di produzione di e-cherosene, sono suddivise in: cattura diretta di anidride carbonica dall'atmosfera detta "*Direct Air Capture*" (*DAC*), elettricità usata nel processo di *DAC*, elettricità usata nel processo di elettrolisi per la produzione di idrogeno da acqua e nella sintesi di Fischer-Tropsch (*FT*), perdite di CO_2 durante il processo, emissioni derivanti dal fine di vita del processo "*End Of Life*" (*EOL*) e combustione del carburante.

TABELLA 2.3.3. Valori di emissione, in gCO_2eq/MJ , relativi alle fasi della filiera di produzione e dell'uso dell'e-cherosene tramite il processo Power-to-Liquid. I dati provengono da Micheli et al. (2022) "Life-Cycle Assessment of Power-to-Liquid Kerosene Produced from Renewable Electricity and CO_2 from Direct Air Capture in Germany".

FASI DELLA FILIERA	Valori con uso di Energia eolica (gCO_2eq/MJ)	Valori con uso di energia fotovoltaica (gCO_2eq/MJ)
<i>DAC</i>	-75.0	-75.0
Elettricità per <i>DAC</i>	0.339	1.51
Elettricità per elettrolisi e FT	5.23	23.3
Perdite di CO_2 di processo	3.75	3.75
End of life (<i>EOL</i>)	3.60	3.60
Combustione	71.4	71.4
Totale	9.32	28.56

Nella Tabella 2.3.3 si nota come l'uso di energia derivante dal settore eolico, induca ad un minor valore di emissione rispetto al settore fotovoltaico. Inoltre, facendo una comparazione con le emissioni derivanti dalla produzione di JET-A1 si nota che nel caso in cui venga usata energia eolica per la produzione di e-cherosene avviene un risparmio in termini di anidride carbonica equivalente pari a 89.5%, mentre con l'uso di energia fotovoltaica si ha un risparmio di 67.9%.

SPIEGAZIONE TECNICA DEL PROCESSO:

Facendo parte dei *SAF* creati tramite l'uso della tecnologia Fischer-Tropsch, il processo *PtL* ha come obiettivo iniziale la creazione del "syngas", in modo poi da procedere alla sua sintesi come illustrato nel Sottocapitolo 2.3.

La prima fase del processo che porta alla creazione del gas di sintesi prevede l'acquisizione dell'anidride carbonica che può essere ricavata in molteplici vie, in modo da riutilizzare o acquisire in modo sostenibile questo tipo di gas serra. Una delle forniture di CO_2 usate per ottimizzare gli interventi diretti sulle concentrazioni rilevate in atmosfera di questo gas consiste nella cattura diretta dell'anidride carbonica dall'aria ovvero la *DAC*, acronimo di "Direct Air Capture".

Il tipo di procedimento precedentemente citato è particolarmente indicato agli scopi ambientali per cui i *SAF* sono stati creati. L'anidride carbonica, da rifiuto gassoso e in alte concentrazioni dannoso per il sistema, è riciclata a materia prima essenziale nella produzione del combustibile, innestando un ciclo di riutilizzo molto efficace. Oltre a questa soluzione, esistono altri modi sviluppati per l'acquisizione della CO_2 come, ad esempio la separazione del gas direttamente dagli impianti di scarico industriali, che spesso vengono rilasciati in atmosfera.

Per la formazione del “*syngas*”, poi, è necessario l'idrogeno, ricavato dall'elettrolisi sostenibile dell'acqua innescando la scissione della molecola acquosa tramite la formula:



Tale formula rappresenta il metodo più diretto per ricavare l'idrogeno da fonti non fossili; la formazione della molecola di H_2 tramite elettrolisi necessita di energia rinnovabili dalle fonti indicate nella sezione riguardanti le materie prime utilizzate, questo per garantire che il processo sia altamente sostenibile ed efficace dal punto di vista ambientale. La scissione elettrochimica nella Formula 2.2 può essere realizzata nell'ambito di un'elettrolisi alcalina o di membrana a scambio protonico, tecnologia largamente usata per la formazione dell'idrogeno.

PRODOTTI FINALI:

Da questo tipo di tecnologia, si forma un cherosene sintetico definito specificamente e-cherosene.

Essendo prodotto, nella sua seconda parte, tramite il processo Fischer-Tropsch, il carburante in uscita presenterà le stesse caratteristiche di quello prodotto a partire dalle materie prime di origine biologica (FT-SPK). Per completezza e integrità del documento viene riportata una tabella riassuntiva di queste specifiche.

TABELLA 2.3.4. Valori delle proprietà dell'e-cherosene prodotto tramite la tecnologia "Power to Liquids", si nota che i valori, tranne FRL, sono gli stessi indicati da ASTM D7566 23-b riguardo le proprietà specifiche di FT-SPK.

PROPRIETÀ E-CHEROSENE	VALORI
Densità a 15°C	Da 730 a 770 kg/m ³
Punto di infiammabilità	38°C
Punto di ebollizione	300°C
Punto di congelamento	-40°C
Miscelazione con JET-A1	50%
<i>FRL: "Fuel readiness level"</i>	5

Si nota quindi, che la tecnologia *PtL*, crea un prodotto molto valido dal punto di vista tecnico, ma allo stesso tempo, avendo una palpabile difficoltà nell'approvvigionamento delle materie prime, specialmente per l'anidride carbonica, presenta un indice di disponibilità commerciale del carburante inferiore rispetto al prodotto classico derivato dalla biomassa.

COSTI ASSOCIATI:

Per questa tipologia di carburante sono disponibili delle stime di prezzo di vendita trovate su articoli diversi, come ad esempio quello di Leonard Berberi pubblicato sul Corriere della Sera il 28 aprile 2023 dal titolo: "Voli più cari fino al 50% per l'uso dei biocarburanti imposto dalla Ue", in cui il prezzo dell'e-cherosene indicato è pari a circa 3800 €/ton.

Oppure da Bullerdiek *et al.* (2023) nell'articolo: "Renewable fuel options for aviation – A System Wide comparison of Drop-In and non-Drop-In fuel options" in cui il prezzo di vendita mediano rilevato è di 65.5 €/Gj.

Si nota quindi, la differenza di prezzo che questa tecnologia comporta, rendendo questo carburante il più costoso della gamma dei *SAF*.

2.4 - HEFA (HEFA-SPK)

Il terzo tipo di carburante sostenibile che verrà analizzato, corrisponde al processo di produzione maggiormente industrializzato attualmente. Si tratta del processo *HEFA*, ovvero “*Hydroprocessed Esters and Fatty Acids*” traducibile in: esteri e acidi grassi idro-processati. La peculiarità, di questo percorso di produzione *SAF*, è rappresentata dalla sua derivazione per intero da materie prime di forma biologica.

Nel regolamento *ReFuelEU*, questa gamma di *SAF* trova collocazione nella sezione dei biocarburanti in quanto esso è prettamente ricavato dalla lavorazione di oli vegetali e alimentari.

Di seguito quindi, come per i precedenti carburanti sostenibili, si procede all’analisi dettagliata delle sue caratteristiche.

MATERIE PRIME:

Per la realizzazione di questo combustibile sono utilizzati esclusivamente prodotti derivanti dal trattamento della biomassa. Fornendo un elenco delle materie prime che entrano in gioco nella creazione di questo *SAF* troviamo: distillato di acidi grassi di palma, camelina, brassica carinata, sego e oli vegetali come olio di palma, olio di mais, olio di soia, olio di colza e oli da cucina usati.

STUDIO LCA DELLE FASI DELLA FILIERA DI PRODUZIONE DEL SAF:

L’operazione di analisi del ciclo di vita, delle fasi della filiera di produzione del combustibile con *HEFA*, è ricavata da studi specifici condotti dall’*ICAO*. Questi studi sono stati usati anche in fase di compilazione della stessa sezione nel Sottocapitolo 2.3.1 riguardante FT-SPK. Inoltre, nella sezione attuale, ai dati forniti dall’*ICAO*, sono integrati quelli derivanti dall’articolo di Undavalli *et al.* (2023) “*Recent advancements in sustainable aviation fuels*”.

Una mediazione sui valori è riportata nella Tabella 2.4.1.

TABELLA 2.4.1. Emissioni, in gCO_2eq/MJ , delle fasi della filiera di produzione e dell'uso di HEFA-SPK, da uno studio incrociato dei documenti: “Report on the feasibility of a long-term aspirational goal (LTAG) for international civil aviation CO2 emission reductions” e “Recent advancements in sustainable aviation fuels”; rispettivamente di ICAO e Undavalli et al. (2021).

Materie prime per la sintesi di HEFA-SPK	Produzione alla fonte	Trasporto	Produzione in SAF	Trasporto del SAF	Combustione	Totale in gCO_2eq/MJ
SEGO	11.8	0.5	9.7	0.5	0.0	22.5
OLIO DA CUCINA USATO	2.4	0.2	11.2	0.1	0.0	13.9
DISTILLATO DI ACIDI GRASSI DI PALMA	6.6	0.4	13.6	0.1	0.0	20.7
OLIO DI MAIS	2	0.3	14.7	0.2	0.0	17.2
OLIO DI SOIA	19.8	1.2	18.9	0.5	0.0	40.4
OLIO DI COLZA	29.7	0.7	16.5	0.5	0.0	47.4
CAMELINA	23.3	0.6	17.7	0.4	0.0	42.0
OLIO DI PALMA	16	3.5	17.3	0.6	0.0	37.4
BRASSICA CARINATA	16.4	0.6	17.1	0.3	0.0	34.4

Dalla tabella sopra riportata, si può notare che la formazione del SAF HEFA-SPK, può classificarsi nella media, in un'ipotetica scala caratterizzata dalle emissioni di anidride carbonica durante il ciclo di vita dei carburanti. Si nota che, l'olio di colza con 47.4 gCO_2eq/MJ è il più impattante ambientalmente, mentre l'olio da cucina usato è quello di minor impatto con 13.9 gCO_2eq/MJ .

SPIEGAZIONE TECNICA DEL PROCESSO:

La produzione del cherosene paraffinico sintetico derivato dalla idro-processazione di esteri e acidi grassi prevede l'uso dei trigliceridi, componente altamente presente negli oli; questa forma di trattamento è stata sperimentata in modo da riciclare questi oli, prodotti di scarto altamente presenti e largamente usati.

La formazione dell'HEFA-SPK segue un processo di più fasi:

- 1) **RAFFINAZIONE:** per utilizzare le materie prime scritte in precedenza, gli oli da essi derivati, devono essere raffinati. L'olio vegetale può essere estratto dalle piante con metodi semplici come, ad esempio, un normale frantoio; gli oli di origine alimentare invece devono subire uno specifico processo di purificazione, in modo da eliminare delle precise impurità dannose al proseguo del trattamento.
- 2) **DEOSSIGENAZIONE E IDROGENAZIONE:** l'olio ottenuto dalla raffinazione, tramite la sua reazione con idrogeno, a una temperatura di 325°C e pressione pari a 50 bar, forma idrocarburi puri. Successivamente è implementata la fase di rimozione dell'ossigeno dalla molecola di trigliceride, in quanto essa, secondo le specifiche, non può rappresentare una componente di un carburante per aerei. Contemporaneamente a questa operazione, i legami insaturi della molecola vengono idrogenati, formando catene idrocarburiche lineari, con le sole componenti di carbonio e idrogeno.
- 3) **CRACKING E ISOMERIZZAZIONE:** avendo formato, a questo punto del processo, catene di idrocarburi molto lunghe, si opera ad accorciarle con l'operazione di "*cracking*", in quanto esse incidono molto sulle proprietà fisiche e chimiche del carburante. Avviene quindi, la formazione di idrocarburi a catena più corta, conformi alle specifiche ASTM; inoltre, poi, in parallelo a questa fase si opera una isomerizzazione mirata a ramificare la catena e ottenendo così degli idrocarburi ramificati.
- 4) **DISTILLAZIONE:** il liquido ottenuto tramite le fasi precedenti, è sottoposto a una distillazione comprendente, una separazione in cui vengono rimossi l'acqua e le componenti gassose e una distillazione vera e propria con la creazione di HEFA-SPK.

PRODOTTI FINALI:

Con la tecnologia *HEFA*, viene prodotto quindi un carburante sostenibile per l'aviazione chiamato cherosene sintetico paraffinico prodotto tramite idro-processazione di esteri e acidi grassi (HEFA-SPK).

Per semplicità di scrittura nella Tabella 2.4.2 sono riportate le specifiche di questo carburante, indicate da ASTM D7566 23-b.

TABELLA 2.4.2. Valori indicati da ASTM D7566 23-b riguardo le proprietà specifiche di HEFA-SPK.

PROPRIETÀ HEFA-SPK	VALORI
Densità a 15°C	Da 730 a 772 kg/m ³
Punto di infiammabilità	38°C
Punto di ebollizione	300°C
Punto di congelamento	-40°C
Miscelazione con JET-A1	50%
<i>FRL: "Fuel readiness level"</i>	9

Come si può notare dalla tabella sovrastante, le specifiche sono molto simili a quelle di FT-SPK, gli unici valori diversi li troviamo: nella densità, anche se con un valore molto simile e nell'*FRL*, indicando un alto progresso nella commercializzazione di questo prodotto.

COSTI ASSOCIATI:

Per questo tipo di carburante sostenibile per l'aviazione i prezzi forniti sono: 3500 €/ton secondo Leonard Berberi del Corriere della Sera e 28,1 €/Gj per Bullerdiel *et al.* (2023) nell'articolo: "*Renewable fuel options for aviation – A System Wide comparison of Drop-In and non-Drop-In fuel options*".

2.5 - ALCOHOL TO JET (ATJ-SPK)

Un'altra tecnica, di creazione di carburante sostenibile per l'aviazione, è la trasformazione *alcohol to jet*, questo tipo di tecnologia permette di sintetizzare un tipo di cherosene sintetico paraffinico simile a quelli spiegati nei precedenti capitoli, nel particolare si produce ATJ-SPK.

Tramite questo trattamento, avviene la fermentazione biochimica delle piante da zucchero edibili, con la conseguente formazione di alcohol utile alla produzione di combustibile per aviazione.

All'interno del regolamento *ReFuelEU Aviation*, ATJ-SPK si colloca nella gamma dei biocarburanti essendo parte, citando testualmente il regolamento dei "carburanti liquidi per il trasporto ricavati dalla biomassa".

MATERIE PRIME:

Nella creazione del *SAF* in questione, vengono coinvolte una serie di sostanze biogene, in particolare derivanti da piante usate nella produzione di zucchero. Tra queste troviamo: canne da zucchero, chicchi di mais, melassa, colture energetiche erbacee, residui agricoli e residui forestali.

STUDIO LCA DELLE FASI DELLA FILIERA DI PRODUZIONE DEL SAF:

Con la stessa metodologia usata in precedenza per lo studio di FT-SPK e HEFA-SPK, usando una correlazione tra lo studio *ICAO "Report on the feasibility of a long-term aspirational goal (LTAG) for international civil aviation CO2 emission reductions"* e lo studio condotto da Prussi *et al.* (2021) "*CORSIA: The first internationally adopted approach to calculate life cycle GHG emissions for aviation fuels*", si procede all'illustrazione dei valori di emissione di CO_2 equivalente in atmosfera, delle fasi della filiera di produzione e dell'uso di ATJ-SPK.

TABELLA 2.5.1. Emissioni, in gCO_2eq/MJ , delle fasi della filiera di produzione e dell'uso di ATJ-SPK, da uno studio incrociato dei documenti: “Report on the feasibility of a long-term aspirational goal (LTAG) for international civil aviation CO2 emission reductions” dell’ICAO e “CORSIA: The first internationally adopted approach to calculate life cycle GHG emissions for aviation fuels” di Prussi et al. (2021).

Materie prime per la sintesi di ATJ-SPK	Produzione alla fonte	Trasporto	Produzione in SAF	Trasporto del SAF	Combustione	Totale in gCO_2eq/MJ
RESIDUI AGRICOLI	1.8	3.8	23.4	0.3	0.0	29.3
RESIDUI FORESTALI	2.3	2.6	18.6	0.3	0.0	23.8
MELASSA	17.8	2.5	6.4	0.3	0.0	27.0
CHICCHI DI MAIS	19.8	0.2	35.5	0.3	0.0	55.8
CANNE DA ZUCCHERO	14.9	0.6	8.2	0.3	0.0	24.0
COLTURE ENERGETICHE ERBACEE	13.3	2.9	26.9	0.3	0.0	43.4

Dalla Tabella 2.5.1, si può notare come in proporzione alle altre modalità di produzione del carburante sostenibile per l’aviazione, la tecnologia ATJ si classifichi in una posizione intermedia, dimostrandosi una buona tipologia di produzione di SAF, ma non la migliore dal punto di vista ambientale.

Inoltre, con i valori riportati, si individuano i chicchi di mais come materia prima più impattante ambientalmente e i residui forestali come i meno influenti.

SPIEGAZIONE TECNICA DEL PROCESSO:

Grazie alla denominazione *alcohol to jet*, si riesce, in maniera diretta, a capire la principale derivazione di questa tipologia di carburante, ovvero gli alcoli.

Gli alcoli possono essere prodotti seguendo molteplici processi, ma la modalità più consolidata è rappresentata dalla fermentazione degli zuccheri tramite gli amidi, come ad esempio avviene nella produzione dell'etanolo.

Oltre l'etanolo, nella produzione di ATJ-SPK, vengono coinvolti altri tipi di alcoli, con l'unica caratteristica di essere costituiti da un massimo di cinque atomi di carbonio. Per creare il *SAF* in questione, l'insieme di queste molecole, segue un processo ben definito riassumibile nel susseguirsi di quattro fasi:

- 1) **DISIDRATAZIONE:** gli alcoli ottenuti tramite la fermentazione degli zuccheri grazie all'azione degli amidi, devono essere divisi dalle particelle di acqua che, insieme alle altre impurità, possono essere controproducenti nella sintetizzazione del biocarburante;
- 2) **OLIGOMERIZZAZIONE:** gli alcheni presenti nella fase gassosa, si legano tra loro tramite una reazione di oligomerizzazione, questo in modo da formare molecole di alcoli più grandi, detti oligomeri, necessarie al proseguo del processo;
- 3) **IDROGENAZIONE:** dalla fase precedente, si formano gli oligomeri, ovvero lunghe catene formate da numeri diversi di atomi di carbonio. Essi per proseguire nella formazione del *SAF*, vengono prima separati e poi saturati con idrogeno. L'operazione di idrogenazione è necessaria a trasformare tutti i legami doppi, presenti nella molecola, in legami singoli, rendendo la catena adatta alle specifiche indicate per i carburanti per aviazione;
- 4) **DISTILLAZIONE:** infine, come per i carburanti sostenibili illustrati nei capitoli precedenti, le molecole idrocarburiche ottenute tramite le fasi di oligomerizzazione e idrogenazione, subiscono una distillazione, in modo da ottenere un carburante per aerei utilizzabile (ATJ-SPK).

PRODOTTI FINALI:

Grazie alla tecnologia *alcohol to jet*, si riesce a ottenere un carburante sostenibile per l'aviazione facente parte, come FT-SPK e HEFA-SPK, della gamma dei cheroseni sintetici paraffinici; in particolare viene distillato il cherosene sintetico paraffinico ottenuto con lo sviluppo *alcohol to jet* (ATJ-SPK).

Nella Tabella 2.5.2 vengono fornite le specifiche del SAF in questione derivate da ASTM D7566 23-b.

Tabella 2.5.2. Valori indicati da ASTM D7566 23-b riguardo le proprietà specifiche di ATJ-SPK.

PROPRIETÁ ATJ-SPK	VALORI
Densità a 15°C	Da 730 a 770 kg/m ³
Punto di infiammabilità	38°C
Punto di ebollizione	300°C
Punto di congelamento	-40°C
Miscelazione con JET-A1	50%
<i>FRL: "Fuel readiness level"</i>	7

Dalla Tabella 2.5.2, si può notare come le specifiche siano esattamente compatibili con quelle di FT-SPK, rendendo questi due tipi di processi di produzione di carburante sostenibile molto valide e interscambiabili nella scelta da parte delle compagnie aeree. L'*FRL* risulta essere sufficientemente alto, dimostrando quanto questa tecnologia sia diffusa nel mercato.

COSTI ASSOCIATI:

Come per i biocarburanti studiati in precedenza, FT-SPK e HEFA-SPK, è possibile ricavare una stima dei prezzi di vendita, da articoli presenti sull'argomento. Secondo Leonard Berberli del Corriere della Sera il prezzo si aggira sui 3500 €/ton; mentre per Bullerdiel *et al.* (2023) nell'articolo: "*Renewable fuel options for aviation – A System Wide comparison of Drop-In and non-Drop-In fuel options*" il prezzo mediano è di 37.6 €/Gj. Di conseguenza in un'ipotetica classifica dei prezzi, dei SAF studiati, ATJ-SPK si colloca in una posizione intermedia.

2.6 - ISO-PARAFFINE SINTETIZZATE (SIP)

L'ultima modalità di creazione di *SAF*, che verrà trattata in questo documento, porta alla produzione di un idrocarburo chiamato nel linguaggio tecnico "iso-paraffina sintetizzata". Questo tipo di molecola deriva dal frazionamento e dall'idro-trattamento del farnesene dalla fermentazione dello zucchero.

All'interno del regolamento *ReFuelEU*, la tipologia di *SAF* in questione fa parte della categoria dei biocarburanti, in quanto il prodotto finale, corrisponde a un carburante liquido per il trasporto derivato dal trattamento della biomassa.

Si forma così un carburante sostenibile per l'aviazione derivato dal trattamento diretto sulla biomassa, quindi un biocarburante.

MATERIE PRIME:

Similmente al processo di produzione "*alcohol to jet*", le materie prime coinvolte nella sintetizzazione delle iso-paraffine sono: canne da zucchero e barbabietola da zucchero. Queste subiscono una fermentazione per poi proseguire nel ciclo produttivo con creazione delle *SIP*.

STUDIO LCA DELLE FASI DELLA FILIERA DI PRODUZIONE DEL SAF:

I valori *LCA*, delle fasi della filiera di produzione del presente metodo produttivo, vengono riportati nella Tabella 2.6.1, sono contenute in essa, le varie distinzioni in base alle sezioni che compongono la filiera, in modo da dare una visione più integra di quanto ogni materia prima impatti, durante il ciclo di vita di produzione del carburante.

Come per FT-SPK e HEFA-SPK, i dati sono stati ricavati da: "*Report on the feasibility of a long-term aspirational goal (LTAG) for international civil aviation CO2 emission reductions*" pubblicato dall'ICAO e "*CORSIA: The first internationally adopted approach to calculate life cycle GHG emissions for aviation fuels*" articolo di Prussi *et al.* (2021).

TABELLA 2.6.1. Emissioni, in gCO_2eq/Mj , delle fasi della filiera di produzione e dell'uso di SIP, da uno studio incrociato dei documenti: "Report on the feasibility of a long-term aspirational goal (LTAG) for international civil aviation CO2 emission reductions" dell'ICAO e "CORSA: The first internationally adopted approach to calculate life cycle GHG emissions for aviation fuels" di Prussi et al. (2021).

Materie prime per la sintesi di SIP	Produzione alla fonte	Trasporto	Produzione in SAF	Trasporto del SAF	Combustione	Totale in gCO_2eq/MJ
CANNE DA ZUCCHERO	19.8	2.4	10.3	0.3	0.0	32.8
BARBABIE-TOLA DA ZUCCHERO	17.3	1.3	13.5	0.3	0.0	32.4

Si nota come, in relazione alle altre tecnologie di produzione SAF analizzate nei capitoli precedenti, le emissioni di anidride carbonica derivanti dalle materie prime coinvolte nelle fasi della filiera del processo di produzione delle iso-paraffine sintetizzate, si collocano nella media di una virtuale classifica; questo induce a pensare le SIP, mediamente vantaggiose dal punto di vista ambientale. Inoltre, si nota come ci sia una piccola differenza di emissione tra le due materie prime utilizzate: $32.8 gCO_2 eq/MJ$ per la canna da zucchero e $32.4 gCO_2 eq/MJ$ per la barbabietola da zucchero.

SPIEGAZIONE TECNICA DEL PROCESSO:

L'intero ciclo di produzione delle iso-paraffine sintetizzate, ruota intorno alla lavorazione di una molecola specifica ovvero il farnesano; questa molecola è un alcano a catena lunga triplo ramificato ($C_{14}H_{32}$).

Alla base della produzione del farnesano, c'è la lavorazione del farnesene, sua molecola precorritrice che viene prodotta dallo zucchero:

- 1) **PRODUZIONE FARNESENE:** tramite un processo di fermentazione, il lievito produce dallo zucchero il farnesene; il lievito usato in questa fase è geneticamente modificato, questo per far sì che esso produca la molecola di idrocarburo farnesene e non l'etanolo come normalmente avverrebbe;

- 2) IDROGENAZIONE: il farnesene, è una molecola con quattro legami doppi, la sua formula bruta è $C_{14}H_{24}$; per far sì che esso diventi un idrocarburo adatto alla creazione di carburante per aviazione, deve essere idrogenato, in modo da evitare la cattiva predisposizione allo stoccaggio dovuta all'instabilità dei doppi legami presenti nella molecola. Una volta ultimata l'idrogenazione, si forma il farnesano con formula bruta $C_{14}H_{32}$.
- 3) PURIFICAZIONE E DISTILLAZIONE: la fase di finale del processo di produzione delle *SIP*, prevede la purificazione del farnesano prodotto dall'idrogenazione del farnesene, tramite il processo di distillazione, con la produzione di iso-paraffine sintetizzate.

PRODOTTI FINALI:

Con il processo *SIP*, in cui avviene la trasformazione da farnesene a farnesano tramite idrogenazione e la sua successiva distillazione, si ottiene un tipo di carburante sostenibile per l'aviazione denominato iso-paraffine sintetizzate.

Nella Tabella 2.6.2, vengono riportati i valori forniti da ASTM D7566 23-b riguardo le specifiche proprietà che il carburante prodotto tramite *SIP* deve rispettare per essere commercializzato e utilizzato in aviazione.

TABELLA 2.6.2. Valori indicati da ASTM D7566 23-b riguardo le proprietà specifiche di *SIP*.

PROPRIETÀ <i>SIP</i>	VALORI
Densità a 15°C	Da 765 a 780 kg/m^3
Punto di infiammabilità	100°C
Punto di ebollizione	255°C
Punto di congelamento	-60°C
Miscelazione con JET-A1	10%
<i>FRL</i> : "Fuel readiness level"	5

Comparando la Tabella 2.6.2 con le sue gemelle, relative alle tipologie di *SAF* studiate nei capitoli precedenti, si può notare come la tecnologia *SIP* produca un carburante sostenibile per l'aviazione con molteplici proprietà differenti.

La densità rimane pressoché invariata; il punto di infiammabilità è in proporzione a una temperatura più del doppio maggiore rispetto agli altri *SAF*; il punto di ebollizione

è invece nettamente inferiore e quello di congelamento è di 20°C inferiore alla maggioranza dei *SAF*. Tutto ciò comporta una potenziale miscibilità con il carburante JET-A1 pari al 10%, quantità molto inferiore rispetto a FT-SPK, PtL, HEFA-SPK e ATJ-SPK; e ciò comporta anche un valore di *FRL* basso rispetto alla media dei sopracitati carburanti sostenibili.

COSTI ASSOCIATI:

Come nel caso dei *SAF* analizzati negli scorsi capitoli, si riportano delle stime fornite da: Leonard Berberi del Corriere della Sera nell'articolo "*Voli più cari fino al 50% per l'uso dei biocarburanti imposto dalla Ue*" del 28 aprile 2023, in cui per i biocarburanti è indicato un prezzo di 3500 €/ton e Bullerdiek *et al.* (2023) nell'articolo: "*Renewable fuel options for aviation – A System Wide comparison of Drop-In and non-Drop-In fuel options*" in cui il prezzo fornito è pari a 127.5 €/Gj; in particolare da quest'ultimo dato, si nota come il prezzo di vendita per questo tipo di *SAF*, sia nettamente più alto di tutto il resto della gamma di carburanti, confermando così l'*FRL* relativamente basso che lo contraddistingue.

CAPITOLO 3

3.1 - RICHIESTA FUTURA DI E-CHEROSENE

Dallo sviluppo relativo ai carburanti sostenibili per l'aviazione, analizzati nel Capitolo 2, spicca per qualità decarbonizzanti il prodotto derivante dalla sintesi di Fischer-Tropsch tramite tecnologia "Power to Liquids", ovvero l'e-cherosene.

Suddetto tipo di SAF riesce a innestare un ciclo di riutilizzo dell'anidride carbonica, trasformandola da prodotto di scarto, emessa nella fase di combustione, a materia prima, necessaria alla creazione del carburante. Per questa sua specifica peculiarità, risulta essere la modalità di decarbonizzazione più efficiente che il settore dell'aviazione possiede, con l'obiettivo di purificare le sue emissioni nel breve periodo.

Non a caso, l'Unione Europea, con la pubblicazione del regolamento *ReFuelEU Aviation*, intende imporre una soglia minima di utilizzo di questa tipologia di carburante nell'arco temporale dal 2030 al 2050 e una soglia media per i relativi primi cinque anni, come descritto dalla Tabella 1.1 nel Sottocapitolo 1.2.

Per contestualizzare il tutto si riporta una tabella contenente l'estratto relativo a ciò che è stato precedentemente indicato.

TABELLA 3.1. Soglie minime indicate dall'UE relative all'uso di carburanti sintetici per l'aviazione, come lo è l'e-cherosene. Con SAFs med sono indicate le quote medie da rispettare, con SAFs min le quote minime.

Anno	2030	2031	2032	2033	2034
SAFs med	1.2%	1.2%	2.0%	2.0%	2.0%
SAFs min	0.7%	0.7%	1.2%	1.2%	2.0%
Anno	2035	2040	2045	2050	
SAFs min	5.0%	10.0%	15.0%	35.0%	

Dalla Tabella 3.1, si può notare, come gradualmente venga imposta in Europa una sempre più crescente soglia di utilizzo di questa tipologia di carburante, arrivando ad essere pari ad almeno il 35% rispetto al totale dei combustibili, usati in aviazione in Europa, nell'anno 2050.

In correlazione ai dati imposti dall'Unione, risulta fondamentale inquadrare in che modo si svilupperà la richiesta di e-cherosene nella stessa fascia temporale in cui sono

imposte le soglie minime di utilizzo di tale carburante. Molti studi hanno come argomento centrale la previsione dei *trend* relativi a questa richiesta, risultando utili sia ai produttori di questo *SAF* e sia alle compagnie aeree.

Secondo lo studio condotto da *Transport & Environment: “The challenges of scaling up e-kerosene production in Europe”* del gennaio 2024, si stima che, negli anni futuri, la richiesta di carburante sostenibile per l’aviazione prodotto sotto forma di e-cherosene, con la tecnologia “*Power to Liquids*”, si amplierà sempre di più; relazionando questa richiesta alle percentuali indicate dal *ReFuelEU Aviation* riportate nella Tabella 3.1, si può individuare la quantità di e-cherosene richiesta in Europa per soddisfare il fabbisogno annuale delle compagnie aeree. Inoltre secondo il report di supporto al *ReFuelEU*, “*European Aviation Environmental Report*” condotto dall’ *European Union Aviation Safety Agency (EASA)*, la domanda di carburante per aerei nel 2030 in Europa sarà pari a 46 mega tonnellate (Mt) e sarà destinato a crescere ulteriormente con il passare degli anni; l’azione del *ReFuelEU Aviation* diventa quindi fondamentale per mutare il settore dei trasporti aerei rendendolo nettamente meno incisivo nel quadro generale delle emissioni carboniose in atmosfera.

Di seguito viene quindi fornita una tabella, contenente i dati relativi alla quantità di e-cherosene stimata in Europa, negli anni futuri.

TABELLA 3.2. *Quantità di e-cherosene, in Mt, stimata dal 2030 al 2050, per soddisfare il fabbisogno di carburante sintetico delle compagnie aeree, in modo da rispettare le percentuali del ReFuelEU Aviation. I dati sono stati presi da “The challenges of scaling up e-kerosene production in Europe” pubblicato da Transport & Environment.*

ANNO	2030	2035	2040	2045	2050
Percentuale indicata da <i>ReFuelEU</i>	0.7%	5.0%	10%	15%	35%
Quantità di e-cherosene in Mega Tonnellate (Mt)	0.6	2.6	5.2	8.2	18.8

Analizzando la Tabella 3.2 si può notare come progressivamente l’e-cherosene, col passare degli anni, diventi una qualità di combustibile sempre più incisiva nel settore dei carburanti per l’aviazione, arrivando fino all’ammontare di 18.8 Mt e costituendo il 35% del fabbisogno totale europeo di questo settore.

3.2 - RELAZIONE TRA ANIDRIDE CARBONICA ED E-CHEROSENE

Nell'ottica di prevedere come il mercato dei *SAF* si svilupperà negli anni futuri, specialmente con la volontà di rendere l'e-cherosene il carburante principe del settore dell'aviazione, risulta importante capire le evoluzioni della richiesta di anidride carbonica, necessaria alla creazione del suddetto tipo di combustibile.

Secondo lo studio condotto da Singh *et al.* (2022) "*A critical review of technologies, costs, and projects for production of carbon-neutral liquid e-fuels from hydrogen and captured CO₂*", la produzione di 1 kg di e-cherosene necessita l'utilizzo di circa 1.36 kg di H_2 e circa 14.55 kg di CO_2 . Questa relazione è valida rispettando la Reazione 2.1 indicata nel Sottocapitolo 2.3, in cui viene esplicitata la modalità di formazione del "syngas" partendo da idrogeno e monossido di carbonio, quest'ultimo ricavato a sua volta da anidride carbonica.

Dai valori forniti da Singh *et al.*, la CO_2 ha un valore molto elevato, che consentirebbe di all'incirca pareggiare l'anidride carbonica equivalente, emessa dalla produzione stessa del *SAF* e dalla sua combustione durante la fase di volo. Ciò renderebbe questo tipo di carburante "*carbon neutral*", soddisfacendo le esigenze ambientali relative a questo settore.

Relazionando quindi, i dati stimati di richiesta di e-cherosene forniti nel Sottocapitolo 3.1 in Tabella 3.2, con i valori forniti da Singh *et al.*, si può riuscire a fornire una stima relativa alla quantità di anidride carbonica necessaria alla produzione di *SAF* tramite la tecnologia "*Power to Liquids*".

Per fare ciò, nella tabella successiva, la quantità di e-cherosene richiesta verrà moltiplicata per 14.55, in quanto per realizzare 1 mega tonnellata di tale combustibile sarà necessaria una quantità pari a proprio 14.55 mega tonnellate di CO_2 .

TABELLA 3.3. *Quantità di anidride carbonica necessaria a soddisfare la richiesta di e-cherosene nelle prospettive future, rispettando le soglie previste dal ReFuelEU Aviation.*

ANNO	2030	2035	2040	2045	2050
Quantità di e-cherosene in Mt	0.6	2.6	5.2	8.2	18.8
Quantità di CO ₂ richiesta in Mt	8.73	37.83	75.66	119.31	273.54

La CO₂ diventerà quindi un elemento fondamentale nella realizzazione degli obiettivi ambientali imposti dall'Unione nel pacchetto “*fit for 55*”, passando da problematica nell'inquinamento atmosferico a risorsa necessaria nella sua mitigazione.

Si prospetta quindi un grande ampliamento del mercato relativo all'anidride carbonica, con aggiornamenti e innovazioni nell'acquisizione, stoccaggio e lavorazione di tale elemento.

Dall'analisi condotta in precedenza, uno sviluppo naturale che da essa proviene, mira a capire quali tipologie esistano per procurare, all'industria petrolifera sostenibile, la CO₂, fondamentale materia prima per la creazione di carburante sostenibile innovativo, sotto forma di e-cherosene.

Attualmente, nell'ambito relativo all'acquisizione di questa materia prima esistono diversi modi di recuperare l'anidride carbonica per poi fornirla alle industrie petrolifere in modo da produrre l'e-cherosene.

Facendo una panoramica generale su di essi, si riesce a individuare tre diverse tipologie di reperimento di CO₂:

- **COMBUSTIBILI FOSSILI E PROCESSI INDUSTRIALI:**

La modalità di approvvigionamento di anidride carbonica, tramite l'uso di combustibili fossili è la più utilizzata attualmente, ma al contempo, risulta essere la meno sostenibile dal punto di vista emissivo. Nello specifico, la CO₂ viene recuperata in seguito alla combustione dei suddetti combustibili, usati principalmente per la generazione di energia o calore; si punta quindi a diminuire questa

operazione, ampliando il settore destinato alla produzione di energia rinnovabile, con l'implementazione delle vie fotovoltaiche, idroelettriche, eoliche e pompe di calore. Inoltre, nel caso dei processi industriali l'anidride carbonica è recuperata da processi chimici, i quali utilizzano substrati che nel loro ciclo di vita rilasciano CO_2 . Un esempio di questo è la produzione del cemento, in cui il calcare ($CaCO_3$) viene scaldato e mutato in calce (CaO), con conseguente rilascio di biossido di carbonio, che viene quindi recuperato.

- **ORIGINE BIOGENICA:**

Questa modalità di ricavo di anidride carbonica utilizza la biomassa in maniera sia diretta che indiretta; la sostanza biogena è utilizzata come combustibile solido o trasformato in combustibile liquido/gassoso nella trasformazione diretta, indirettamente invece, viene usata ricavandola dal prodotto dell'ingestione animale o umana o, in modo diverso, dal suo precedente utilizzo in qualità di materiale. La convenienza di questa tipologia deriva dal fatto che, la biomassa, attraverso la fotosintesi, assorbe anidride carbonica durante il suo ciclo di vita, permettendo quindi di catturare e successivamente riemettere CO_2 . Questo genera un bilanciamento, che seppur non nettamente pareggiante, permette di abbassare notevolmente la soglia di emissione, grazie al relativo assorbimento durante il ciclo di vita.

- **DIRECT AIR CAPTURE (DAC):**

La terza modalità di ricezione di anidride carbonica consiste nella sua cattura diretta dall'atmosfera. Nell'aria, la CO_2 è presente in concentrazioni di circa 410 ppm, relativamente basse per risultare facilmente assorbibili dalle tecnologie *DAC*, in quanto ciò comporta un dispendio molto elevato di energia, in relazione alle altre forme di cattura carbonica che sfruttano concentrazioni più elevate.

Fornendo dei valori, il dispendio energetico per la tecnologia *DAC*, ammonta a 250 kWh per ogni tonnellata di CO_2 estratta; mentre per

estrarre e concentrare l'anidride carbonica tramite centrali elettriche a gas naturale e con l'uso di carbone si utilizza una quantità di energia pari rispettivamente a: 100 kWh e 60 kWh per ogni tonnellata di CO_2 estratta.

Da questo punto di vista l'uso della *DAC* sembrerebbe svantaggioso, ma esso è il metodo più diretto per estrarre l'anidride carbonica dall'atmosfera abbassandone le soglie di concentrazione, senza implicare l'uso di componenti terze come nel caso delle prime due tecnologie. L'efficienza di questa modalità potrebbe essere aumentata se venga garantito l'utilizzo di fonti energetiche sostenibili, ad esempio, secondo il report di *Transport & Environment: "European CO2 availability from point-sources and direct air capture"* l'utilizzo del 100% di energia eolica porta a un'efficienza nella rimozione del carbonio, durante il ciclo di vita, pari al 97%.

Non è escluso inoltre, che i progressi tecnologici portino alla sperimentazione di apparecchiature *DAC* funzionanti con quantità energetiche inferiori rispetto alle medie attuali, risultando ancora più efficaci nel settore della decarbonizzazione del futuro.

Dallo sviluppo del documento, si nota quindi come la problematica relativa all'emissione derivante dal settore dell'aviazione, possa essere regolarizzata tramite un intreccio tra visione politica e industria petrolifera; il *ReFuelEU Aviation* emanato dall'UE si pone come obiettivo cardine l'implementazione di soglie obbligatorie relative all'uso, da parte delle compagnie aeree e alla produzione, per i fornitori di carburante, di *SAF* di natura sintetica e non. In relazione a questo, l'industria petrolifera propone una gamma di carburanti sostenibili con diverse qualità di decarbonizzazione, individuando nell'e-cherosene prodotto tramite "*Power to Liquids*" il *SAF* del futuro, essendo il meno inquinante durante il suo ciclo di vita e riuscendo ad alimentarsi con materie prime dirette come lo sono acqua e anidride carbonica, pur avendo un grosso dispendio energetico per la sua produzione, migliorabile con l'uso di energia rinnovabile e con sperimentazioni industriali future.

CONCLUSIONE

Il presente elaborato di tesi ha preso in esame la problematica relativa alle emissioni di gas ad effetto serra derivanti dal settore dell'aviazione; a tal proposito, specialmente nella parte iniziale e finale del documento, sono messe in risalto le volontà e i metodi intrapresi dalla Comunità Europea nell'uniformare la legislazione e la visione futura di tale ambito.

L'Unione Europea mirerà a creare un nuovo mercato comunitario dei carburanti sostenibili per l'aviazione, attraverso l'imposizione di nuove soglie minime e medie di loro utilizzo. Inoltre, inserirà la possibilità di certificare l'uso di tali carburanti tramite il conseguimento volontario di un'etichetta ambientale, che risulterà utile, all'insieme degli attori coinvolti, nell'indirizzare il passeggero verso la scelta di un volo più pulito dal punto di vista emissivo.

Il documento, successivamente, si sviluppa nella ricerca, tramite l'analisi tecnica, della tipologia di carburante più sostenibile dal punto di vista ambientale; questo studio porta a dei risultati tangibilmente rilevanti. Tramite lo studio *LCA* delle fasi della filiera di produzione del *SAF*, si individua nell'e-cherosene prodotto tramite Fischer-Tropsch con la tecnologia "*Power to Liquids*", il combustibile più adatto ad essere usato in futuro per abbattere le emissioni del settore dell'aviazione. Esso, infatti, emette 9.32 gCO_2eq/MJ , dato ben minore del cherosene tradizionale JET-A1 con i suoi 89 gCO_2eq/MJ . Questo avviene grazie all'impiego di materie prime come idrogeno ed anidride carbonica, ottenute tramite l'utilizzo di energia da fonti rinnovabili. Tale carburante risulta inoltre una miglior scelta rispetto a quello derivato tramite l'uso di biomasse trasformate con la tecnologia Fischer-Tropsch, in quanto, l'anidride carbonica richiesta per la sua sintesi viene prelevata dall'ambiente, figurando come rimozione nel bilancio finale netto del sopraccitato gas.

In conclusione, si è arrivati a stimare la quantità di e-cherosene richiesta in futuro fino al 2050, stimandola pari a 18.8 Mt in tale anno, risultando in una richiesta di anidride carbonica pari a 274.54 Mt per la sua sintesi. Ciò crea l'input all'analisi delle differenti metodologie di reperimento della CO_2 , individuando la *DAC* come preferibile operando direttamente sulle concentrazioni atmosferiche di tale gas, pur avendo necessità di evoluzioni tecniche per diminuire l'ammontare di energia elettrica necessaria a realizzarla.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Abrantes, I., Ferreira, A. F., Silva, A., & Costa, M. (2021). Sustainable aviation fuels and imminent technologies - CO₂ emissions evolution towards 2050. *Journal of Cleaner Production*.
- Armaroli, N., Carraro, C., Cazzola, P., Cherchi, E., Tanelli, M., Tavoni, M., Tilche, A., & Torsello, M. (2022). Decarbonizzare i trasporti. Evidenze scientifiche e proposte di policy.
- ASTM International. (2019). ASTM D7566-19. *Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons*. (s.d.).
- ASTM International. (2023). ASTM D1655-22a. *Specification for Aviation Turbine Fuels*. (s.d.).
- Bauen, A., Harris, A., Sim, C., Gudde, N., Prussi, M., & Scarlat, N. (2022). CORSIA Lower Carbon Aviation Fuels: An Assessment of the Greenhouse Gas Emission Reduction Potential. *Applied Sciences*.
- Betteiger, V., Ebner, K., Habersetzer, A., Moser, L., Schmidt, P., Weindorf, W., & Rakscha, T. (2022). Power to Liquids – A scalable and sustainable fuel supply perspective for aviation.
- Blakey, S., Rye, L., & Wilson, C. W. (2011). Aviation gas turbine alternative fuels: A review. *Proceedings of the Combustion Institute*.
- Bono, G., & Todaro, L. (2017). *Meccanica e Macchine*.
- Breyer, C., Fasihi, M., Micheli, M., Oyewo, A., Schmidt, P., & Weindorf, W. (2022). E-Kerosene for Commercial Aviation. From Green Hydrogen and CO₂ from Direct Air Capture – Volumes, Cost, Area Demand and Renewable Energy Competition in the United States and Europe from 2030 to 2050. *DENA-Deutsche Energy-Agentur*.
- Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P. W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barrett, K., Blanco, G., Cheung, W. W. L., Connors, S., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., Jones, C., ... Péan, C. (2023). *IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]*. IPCC, Geneva, Switzerland. (First). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- Drünert, S., Neuling, U., Zitscher, T., & Kaltschmitt, M. (2020). Power-to-Liquid fuels for aviation – Processes, resources, and supply potential under German conditions. *Applied Energy*.
- ENAC. (2023). Verso una roadmap per i sustainable aviation fuels in Italia. Sintesi del percorso dell'Enac per la definizione di SAF policy.
- Hu, J., Yu, F., & Lu, Y. (2012). Application of Fischer–Tropsch Synthesis in Biomass to Liquid Conversion. *Catalysts*.

- ICAO Document. (2022). CORSIA Default Life Cycle Emissions Values for CORSIA Eligible Fuels. *Annex XVI*.
- ICAO Document. (2022). SAF Production Projections and Associated Ghg Emissions Reductions. Attachment B to Appendix M5. ICAO Report on the feasibility of a long-term aspirational goal (LTAG) for international civil aviation CO2 emission reductions.
- Liu, G., Yan, B., & Chen, G. (2013). Technical review on jet fuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Micheli, M., Moore, D., Bach, V., & Finkbeiner, M. (2022). Life-Cycle Assessment of Power-to-Liquid Kerosene Produced from Renewable Electricity and CO2 from Direct Air Capture in Germany. *Sustainability*.
- McQuillen, J., Leishman, R., & Williams, C. (2022). European CO2 availability from point-sources and direct air capture. *Report for: Transport & Environment*.
- Mutrelle, C. (2024). The challenges of scaling up e-kerosene production in Europe. *Study for: Transport & Environment*.
- Prussi, M., Lee, U., Wang, M., Malina, R., Valin, H., Taheripour, F., Velarde, C., Staples, M. D., Lonza, L., & Hileman, J. I. (2021). CORSIA: The first internationally adopted approach to calculate life cycle GHG emissions for aviation fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Quante, G., Bullerdiek, N., Bube, S., Neuling, U., & Kaltschmitt, M. (2023). Renewable fuel options for aviation – A System-Wide comparison of Drop-In and non-Drop-In fuel options. *Fuel*.
- Regolamento (UE) 2023/2405 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 18 ottobre 2023, sulla garanzia di condizioni di parità per un trasporto aereo sostenibile (*ReFuelEU Aviation*). (s.d.).
- Richter, S., Braun-Unkhoff, M., Naumann, C., & Riedel, U. (2018). Paths to alternative fuels for aviation. *CEAS Aeronautical Journal*.
- Seber, G., Escobar, N., Valin, H., & Malina, R. (2022). Uncertainty in life cycle greenhouse gas emissions of sustainable aviation fuels from vegetable oils. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Singh, H., Li, C., Cheng, P., Wang, X., & Liu, Q. (2022). A critical review of technologies, costs, and projects for production of carbon-neutral liquid e-fuels from hydrogen and captured CO2. *Energy Advances*.
- Springer, A. (s.d.). Sustainable Aviation Fuels Guide.
- Undavalli, V., Gbadamosi Olatunde, O. B., Boylu, R., Wei, C., Haeker, J., Hamilton, J., & Khandelwal, B. (2023). Recent advancements in sustainable aviation fuels. *Progress in Aerospace Sciences*.
- Vozka, P., Šimáček, P., & Kilaz, G. (2018). Impact of HEFA Feedstocks on Fuel Composition and Properties in Blends with Jet A. *Energy & Fuels*.
- Yilmaz, N., & Atmanli, A. (2017). Sustainable alternative fuels in aviation. *Energy*.

RIFERIMENTI SITOGRAFICI

<https://atag.org/facts-figures/>

(ultimo accesso: 29/11/2023)

<https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CD7566-22%7Cen-US&proxycl=https%3A%2F%2Fsecure.astm.org&fromLogin=true>

(ultimo accesso: 15/01/2024)

<http://ilbolive.unipd.it/it/cambiamenti-climatici-emissioni-co2-aereo-viaggio>

(ultimo accesso: 29/11/2023)

<https://www.chimica-online.it/materiali/cherosene-kerosene.htm>

(ultimo accesso: 18/01/2024)

<https://www.consilium.europa.eu/it/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>

(ultimo accesso: 22/11/2023)

<https://www.consilium.europa.eu/it/press/press-releases/2023/10/09/refueeu-aviation-initiative-council-adopts-new-law-to-decarbonise-the-aviation-sector/>

(ultimo accesso: 22/11/2023)

<https://www.easa.europa.eu/eco/eaer/topics/sustainable-aviation-fuels/current-landscape-future-saf-industry>

(ultimo accesso: 27/02/2024)

<https://www.eni.com/it-IT/media/comunicati-stampa/2021/10/cs-eni-avvia-produzione-carburanti-sostenibili-aviazione.html>

(ultimo accesso: 11/12/2023)

<https://www.europarl.europa.eu/news/it/headlines/society/20230316STO77629/cambiamento-climatico-gas-a-effetto-serra-che-causano-il-riscaldamento-globale>

(ultimo accesso: 05/01/2024)

<https://www.hisour.com/it/fischer-tropsch-process-41110/>

(ultimo accesso: 22/01/2024)

<https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>

(ultimo accesso: 22/11/2023)

<https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/resources/spm-headline-statements/>

(ultimo accesso: 29/11/2023)

<https://www.topsoe.com/sustainable-aviation-fuel>

(ultimo accesso: 11/12/2023)

https://www.ttgitalia.com/stories/trasporti/184174_i_carburanti_green_faranno_aumentare_del_50_il_prezzo_dei_biglietti_aerei/

(ultimo accesso: 13/12/2023)

