

Politecnico di Torino

Corso di Laurea in Ingegneria Gestionale
A.a. 2021/2022
Sessione di Laurea Marzo/Aprile 2022

L'introduzione dei biocarburanti nel settore del trasporto aereo:

analisi degli effetti sul traffico passeggeri



Politecnico di Torino

Relatori:
Carlo Cambini
Chiara Ravetti

Candidato:
Antonella Pace

INDICE

ABBREVIAZIONI.....	3
1 INTRODUZIONE	5
2 CONTESTO GENERALE	7
2.1 Dall’Accordo di Parigi, al piano “Fit for 55”	7
2.2 Settore dei trasporti.....	9
2.3 Accordi a livello mondiale per l’aviazione	12
TIMELINE	14
3 PANORAMICA SULLA TECNOLOGIA	15
3.1 Stato dell’arte	15
3.2 Carburanti sostenibili.....	16
3.3 Percorsi di conversione.....	18
3.4 Disponibilità	21
4 REVISIONE DELLA LETTERATURA	23
4.1 L’intensità di carbonio dei biocarburanti.....	23
4.2 Sostenibilità economica dei percorsi	25
4.3 Sostenibilità delle politiche economiche	29
5 METODOLOGIA	37
5.1 Analisi econometrica.....	38
6 DATI	39
6.1 Variabili	40
6.2 Modelli econometrici.....	45
6.3 Analisi empirica.....	46
7 RISULTATI.....	49
8 CONCLUSIONI	56
APPENDICE.....	59
SITOGRAFIA.....	64
BIBLIOGRAFIA	64
Ringraziamenti.....	67

ABBREVIAZIONI

INDC Intended Nationally Determined Contribution

UE Unione Europea

ETS Sistema Europeo di Scambio di quote di emissione

RED Direttive sull'Energia Rinnovabile

CBAM Tassa sul carbonio alle frontiere

IRENA Agenzia Internazionale per le Energie Rinnovabili

ICAO International Civil Aviation Organization

AEA Associazione Europea dell'Ambiente

Gt Giga Tonnellata

CAF Conventional Aviation Fuels

SAF Sustainable Aviation Fuels

EASA Agenzia Europea per la Sicurezza Aerea

GJ Giga Joule

CORSIA Organizzazione Internazionale dell'Aviazione Civile

LCD Least Developed Countries

SIDS Small Island Developing States

ACR American Carbon Registry

CDM Clean Development Mechanism

CAR Climate Action Reserve

GS Gold Standard

VCS Verified Carbon Standard

GNL Gas Naturale Liquefatto

1G Prima Generazione

2G Seconda Generazione

ASTM American Society for Testing and Material

MSW Municipal Solid Waste

FT Fischer-Trophy

HTL Hydrothermal Liquefaction

HEFA Hydroprocessed Esters and Fatty Acids

FOG Oli vegetali e grassi animali

C₁₅ Farnesene

Ptl Power to Liquids

ATJ Alcol To Jet

LCA Life Cycle Assessment

ILUC Included land use change

VAN Valore Attuale Netto

MPS Minimum Selling price

USD United States dollar

RIN Renewable Identification Numbers

CAPEX spese in conto capitale

TAF Traditional Aviation Fuels

RNL Reddito Nazionale Lordo

OPEC Organization of the Petroleum Exporting Countries

1 INTRODUZIONE

Negli ultimi anni la questione ambientale riveste un ruolo centrale nella politica mondiale e nelle vite dei cittadini. È sempre maggiore la consapevolezza verso la vulnerabilità delle risorse naturali e la necessità di tutelare l'ambiente che ci circonda. Questa consapevolezza contribuisce al possibile raggiungimento degli obiettivi della transizione ecologica: la neutralità climatica e la riduzione delle emissioni nette di gas serra (zero-netto). Gli obiettivi di transizione devono trovare applicazione in tutti i settori dell'economia. Il settore del trasporto aereo è attualmente uno dei più complicati da decarbonizzare poiché le tecnologie a disposizione sono limitate e poco mature. I biocarburanti rivestono un ruolo chiave per il settore, ma nonostante siano attualmente disponibili diversi percorsi di produzione la tecnologia risulta relativamente nuova e in uno stadio di commercializzazione poco avanzato.

Dopo aver inquadrato il contesto generale di riferimento a livello politico e legislativo, la seguente trattazione cerca di comprendere il livello di sviluppo della tecnologia ed analizzare i vari percorsi di conversione attualmente disponibili. L'analisi della letteratura esistente consente di comprendere alcune caratteristiche economiche dei percorsi, i prezzi minimi di mercato e le implicazioni per i consumatori. Attualmente meno dell'1% del carburante utilizzato per il trasporto aereo proviene da fonti rinnovabili perché troppo costoso e fuori mercato. Inoltre, la letteratura aiuta a comprendere in che misura le attuali politiche esistenti ed eventuali integrazioni possono contribuire allo sviluppo della tecnologia. È evidente che con l'introduzione di una percentuale di SAF rilevante il prezzo del carburante per Jet aumenterà inevitabilmente e che questo aumento sarà totalmente riversato sui consumatori da parte delle compagnie aeree. Per questa ragione è stata effettuata un'analisi di regressione per comprendere il nesso di causalità tra lo sviluppo economico di un paese (PIL), il prezzo del carburante e il traffico passeggeri. L'analisi è stata effettuata su 51 Paesi "High-Income" ed un arco temporale di 25 anni ed ha mostrato una chiara relazione che lega l'andamento del PIL di un Paese ed il traffico passeggeri. Queste evidenze hanno permesso di concludere che l'andamento crescente del PIL, come

mostrato anche nelle previsioni dell'IMF, aumenterà la propensione a viaggiare e limiterà lo shock causato sul traffico passeggeri dall'aumento dei prezzi del carburante.

2 CONTESTO GENERALE

2.1 Dall'Accordo di Parigi, al piano "Fit for 55"

Il 12 dicembre 2015 è una data storica per il pianeta, la questione ambientale è posta al centro dell'agenda politica ed economica mondiale. I 197 Stati membri della Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici adottano la prima intesa universale e giuridicamente vincolante sul climate change, l'Accordo di Parigi. Oggi di quel patto fanno ufficialmente parte 191 Stati (su 195 firmatari), tutti uniti da un obiettivo comune: evitare potenziali conseguenze catastrofiche dovute al cambiamento climatico.

L'obiettivo principale dell'accordo è quello di contenere l'aumento della temperatura media globale ben al di sotto della soglia di 2°C oltre i livelli pre-industriali e di limitare tale incremento a 1.5°C. Lo scopo è quello di raggiungere il picco delle emissioni globali entro il minor tempo possibile e conseguire successivamente rapide riduzioni secondo le migliori conoscenze scientifiche disponibili, così da riuscire ad ottenere un equilibrio tra emissioni e assorbimento nella seconda metà del secolo.

L'accordo prevede che ogni Paese, al momento dell'adesione, comunichi il proprio contributo a livello nazionale (INDC – Intended Nationally Determined Contribution) con l'obbligo di perseguirne l'attuazione. Inoltre, ogni cinque anni il contributo deve essere aggiornato con nuove proposte.

Nel dicembre 2019 il Consiglio europeo ha approvato l'obiettivo di realizzare un'Europa a impatto climatico zero entro il 2050 e la Commissione Europea ha presentato il Green Deal che riformula l'impegno preso con l'accordo di Parigi. Nell'ambito del Green Deal la Commissione intende riorientare il processo di coordinamento macroeconomico al fine di porre la sostenibilità e il benessere dei cittadini al centro della politica economica. Per realizzare il Green Deal europeo è necessario ripensare le politiche per l'approvvigionamento di energia pulita in tutti i settori dell'economia: industria, produzione e consumo, grandi infrastrutture, trasporti, prodotti alimentari e agricoltura,

edilizia, tassazione e prestazioni sociali. Per conseguire questi obiettivi è essenziale aumentare il valore attribuito alla protezione e al ripristino degli ecosistemi naturali, all'uso sostenibile delle risorse e al miglioramento della salute umana.

I due principali obiettivi del Green Deal sono i seguenti:

- La neutralità climatica dell'Europa entro il 2050 in vista dell'obiettivo di lungo termine relativo al contenimento dell'incremento delle temperature previsto dall'accordo di Parigi.
- Vincolare l'Europa ad una riduzione interna netta delle emissioni di gas serra di almeno il 55% rispetto ai livelli del 1990 entro il 2030.

Per tradurre in pratica il Green Deal il 14 luglio la Commissione europea ha adottato il pacchetto climatico "Fit for 55". È lo sforzo legislativo più poderoso mai tentato fino ad ora per accelerare la transizione verde. Mai nessuno prima dell'Europa aveva cercato di tradurre in legge l'obiettivo zero-netto.

Ridurre le emissioni nette di gas serra di almeno il 55% entro il 2030 rispetto ai livelli preindustriali e raggiungere lo zero-netto entro il 2050 non è più un'ambizione o un'aspirazione, ma un vero e proprio obbligo. La Commissione europea ha valutato le opportunità e i costi derivanti dalla transizione verde e ha dimostrato che se si riuscisse a trovare la giusta combinazione di politiche il saldo economico sarà positivo. Questa convinzione poggia sulla consapevolezza che quello che fa bene al pianeta fa bene anche ai cittadini e all'economia. Infatti, dal 1990 si è registrata una crescita economica di oltre il 62% e un calo delle emissioni del 24%; risulta quindi evidente che la crescita di un paese è dissociata dalle emissioni di CO₂.

Nel complesso, il pacchetto "Fit for 55" rafforza otto atti legislativi pre-esistenti e presenta cinque nuove iniziative in diversi settori strategici: clima, energia e combustibili, trasporti, edilizia, uso del suolo e silvicoltura.

Alcuni dei provvedimenti sono un aggiornamento della legislazione già esistente, per allinearla con il Green Deal e i nuovi target. È il caso della revisione dell'ETS (il mercato del carbonio europeo) con l'introduzione nel mercato dello scambio delle emissioni dell'edilizia e del trasporto stradale, o delle modifiche alla direttiva sulle energie

rinnovabili (RED). In altri casi, invece, il pacchetto “Fit x 55” introduce una nuova legislazione come la proposta di tassa sul carbonio alla frontiera (CBAM) o la nuova strategia forestale dell’UE.

2.2 Settore dei trasporti

Il piano “Fit for 55” pone la sua attenzione sul settore dei trasporti che attualmente detiene un quarto delle emissioni di gas serra dell’Unione Europea.

L’aspetto più preoccupante del settore dei trasporti è che a differenza degli altri settori non ha subito un riassetto delle emissioni rispetto al 1990, infatti, allo stato attuale il trend è ancora crescente (*Figura 1*). È evidente che sono necessarie misure specifiche per allineare questo settore agli altri. Un aspetto fondamentale è certamente la fissazione del prezzo del carbonio, ma sono indispensabili anche altre misure che possono aiutare a contenere le emissioni contribuendo alla riduzione dell’inquinamento atmosferico. Per raggiungere la neutralità climatica per questo settore sarà necessario ridurre le emissioni del 90 % entro il 2050 (IRENA, 2021).

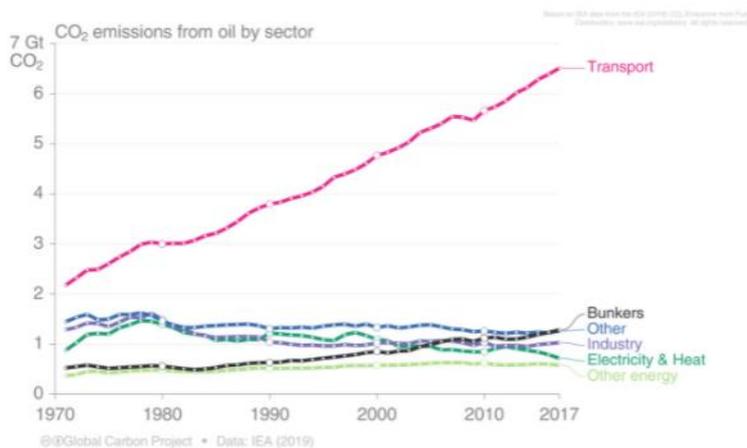


Figura 1-Andamento delle emissioni di CO₂ dei diversi settori dell’economia dal 1970 al 2017

Per comprendere l'anello debole del settore a livello di emissioni si fa riferimento ad uno studio dell'Agenzia europea dell'ambiente del 2012. Nello studio si analizza il consumo in grammi di CO₂ per km percorso per passeggero.

Per giungere a questo risultato è necessario conoscere:

- Consumo medio di carburante per km
- Fattore di emissione (che dipende dal carburante utilizzato)
- Emissioni delle fasi di fabbricazione e di fine vita del veicolo.

Infine, i risultati sono ponderati e divisi per il numero di passeggeri e il numero di chilometri percorsi.

Va specificato che nello studio non si tiene conto delle più moderne tecnologie relative alle automobili (es. auto elettriche, ibride) e ai motori di aerei meno inquinanti sviluppati negli ultimi anni.

I risultati:

- 14 g di CO₂ / passeggero / km per il treno
- 42 g CO₂ / passeggero / km per una piccola auto
- 55 g di CO₂ / passeggero / km per un'auto media
- 68 g CO₂ / passeggero / km per un autobus
- 72 g CO₂ / passeggero / km per un motore a due ruote
- 285 g CO₂ / passeggero / km per un aereo

Da questi risultati è chiaro che il trasporto aereo è di gran lunga il più inquinante e che pertanto necessita di un'immediata regolamentazione che aiuti la decarbonizzazione del settore.

Andando nello specifico il settore dell'aviazione contribuisce al 2% delle emissioni mondiali di CO₂ e al 12% di quelle del settore dei trasporti con circa 915M di tonnellate. (L.J.Wilcox, 2021)

Il trend crescente dell'intero settore dei trasporti esposto in precedenza è confermato anche per il sottoinsieme del trasporto aereo, infatti, secondo i dati le emissioni del

settore potrebbero crescere di un +4% annuo, non prendendo in considerazione l'impatto dal Covid-19 (IRENA, 2019).

Il consumo di Jet Fuel nel 2019 è stato di circa 360 miliardi di litri e si prevede la possibilità di consumare 720 miliardi entro il 2050 con emissioni di CO₂ che possono raggiungere 1,2-1,9 Gt. (ICAO, 2019)

A tal proposito la Commissione Europea propone di eliminare un po' alla volta le quote gratuite di cui il settore beneficia nell'ambito dell'ETS. Per il 2021 l'Unione Europea ha annunciato che il numero di permessi rilasciati al settore dell'aviazione sarà di circa 24,5 milioni. La maggior parte di questi permessi, circa 20,7 milioni, sarà consegnata gratuitamente alle compagnie aeree. L'obiettivo è quello di portare queste quote a zero nel minor tempo possibile.

Nel piano "Fit for 55", alla luce di svariate considerazioni sul settore, l'UE ha deciso di inserire un provvedimento specifico per il settore dell'aviazione, il ReFuelEU Aviation, che ha il compito di regolare l'introduzione di carburanti sostenibili SAF (Sustainable Aviation Fuel) nel settore dell'aviazione.

Il piano prevede l'introduzione graduale di quote minime obbligatorie di carburante sostenibile secondo il seguente schema:

- 2% entro il 2025
- 5% entro il 2030, con una quota minima dello 0,7% di carburante sintetico
- 20% entro il 2035, con una quota minima del 5% di carburante sintetico
- 32% entro il 2040, con una quota minima dell'8% di carburante sintetico
- 38% entro il 2045, con una quota minima dell'11% di carburante sintetico
- 63% entro il 2050, con una quota minima del 28% di carburante sintetico.

Gli operatori aerei e i fornitori di carburante per l'aviazione dovranno comunicare all'Agenzia Europea per la Sicurezza Aerea (EASA) la quantità di carburante utilizzato e fornito.

Inoltre, la Commissione vuole porre fine all'esenzione totale dalle aliquote minime di accisa di cui gode attualmente l'aviazione perché non promuove adeguatamente la riduzione delle emissioni di gas serra, l'efficienza energetica e i combustibili alternativi.

La proposta consiste nel fatto che i carburanti fossili tradizionali come la benzina o il diesel dovrebbero affrontare le tariffe "di riferimento" di 10,75€ al GJ di contenuto energetico per gli usi dei trasporti e 0,9€ al GJ per il riscaldamento, mentre i biocarburanti sostenibili avanzati e l'idrogeno rinnovabile dovrebbero affrontare il prezzo di € 0,15 al GJ per 10 anni.

Una preoccupazione è che le compagnie aeree potrebbero aggirare la tassa sul carburante e le regole SAF con il "tankering", che consiste nel fare il pieno di carburante per jet prima di atterrare in UE riducendo al minimo l'importo che devono acquistare nel blocco europeo. La proposta della Commissione mira a prevenire questa pratica imponendo agli operatori aerei in partenza dagli aeroporti dell'UE di fare rifornimento per un minimo del 90% del totale di carburante a loro necessario per coprire la tratta.

2.3 Accordi a livello mondiale per l'aviazione

L'Europa si impegna sia sul fronte interno che su quello delle politiche esterne relative al clima attraverso la collaborazione con International Civil Aviation Organization (ICAO) dando attuazione al regime di compensazione e riduzione delle emissioni di carbonio del trasporto aereo internazionale.

L'ICAO ha approvato nel 2016 un programma internazionale chiamato CORSIA per la riduzione e la compensazione delle emissioni dell'aviazione internazionale. L'obiettivo dell'ICAO è quello di stabilizzare le emissioni del 2020 cercando di ridurle nel corso degli anni. La direttiva di ICAO si applica ai voli internazionali e non a quelli nazionali, i quali sono regolati dagli NDC del singolo paese. Il CORSIA è, così come l'accordo di Parigi, e a differenza del piano europeo "Fit for 55", a carattere volontario e non ha valenza legislativa.

Infatti, nelle prime due fasi triennali (dal 2021 al 2026) i Paesi decideranno volontariamente se partecipare o meno al sistema, mentre nell'ultima fase (dal 2027 al 2035) la partecipazione sarà obbligatoria. Va specificato che i Paesi meno sviluppati

(LDC), i piccoli stati insulari in via di sviluppo (SIDS), i Paesi in via di sviluppo senza sbocco sul mare (LLDC), saranno esenti dal CORSIA anche in questa seconda fase.

Gli standard consolidati nel mercato del carbonio che sono stati approvati dall'Organizzazione Internazionale dell'Aviazione Civile (ICAO) come "programmi di unità di emissione", che inizialmente forniranno a CORSIA unità di emissioni ammissibili per i requisiti di compensazione nel ciclo 2021-2023 sono: American Carbon Registry (ACR), China GHG Voluntary Emission Reduction Program, Clean Development Mechanism (CDM), Climate Action Reserve (CAR), Gold Standard (GS), e il Verified Carbon Standard (VCS). Per tutte le norme, le unità di emissioni ammissibili sono limitate alle attività che hanno iniziato il loro primo periodo di accredito il 1° gennaio 2016 e per quanto riguarda le riduzioni delle emissioni verificatesi fino al 31 dicembre 2020.

Inoltre, i requisiti di compensazione possono essere scontati riducendo le emissioni di gas serra derivanti dall'utilizzo di carburanti alternativi per aerei. Questo è un mezzo strategico per raggiungere gli obiettivi di carbonio, ridurre la dipendenza del settore dai combustibili fossili e creare un nuovo mercato per i biocarburanti.

La decarbonizzazione del settore dell'aviazione è una sfida complessa che mette sul piatto differenti problematiche, ad esempio, se consideriamo la massa e il volume dei velivoli è facilmente intuibile che allo stato attuale non è pensabile sostituire i motori attuali con dei motori elettrici, a differenza di quanto sta accadendo nel settore automobilistico. Negli ultimi anni sono state effettuate anche delle migliorie sui rendimenti dei carburanti tradizionali e sulla struttura degli aerei attraverso l'alleggerimento e la modifica delle estremità alari (IRENA, 2021), ma l'unica strada che comporta riduzioni rilevanti in tempi relativamente brevi sembra essere esclusivamente quella dell'utilizzo dei carburanti sostenibili.

Nel CORSIA i carburanti sostenibili sono raggruppati sotto un unico termine generico che li identifica: SAF. È necessario che vengano rispettati degli specifici criteri di sostenibilità per certificare un carburante come sostenibile. Il 12 novembre 2021 il Consiglio dell'ICAO ha approvato dei nuovi criteri di sostenibilità ammissibili nell'ambito del Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA), insieme alle linee guida per la valutazione della conformità. Al contempo, in Europa i quadri

normativi che stabiliscono le linee guida per la definizione dei carburanti sostenibili sono contenuti nel decreto RED II , la direttiva (UE) 2018/2001 del Parlamento europeo e del Consiglio, dell'11 dicembre 2018. Nella direttiva, inoltre, si dispone che gli stati membri dell'UE devono avere entro il 2030 una percentuale del 14% del consumo finale di energia del settore dei trasporti proveniente da fonti rinnovabili. Tuttavia, i criteri europei e internazionali non sono ancora completamente allineati.

TIMELINE



3 PANORAMICA SULLA TECNOLOGIA

La spinta Mondiale ed europea verso la sostenibilità e la riduzione delle emissioni dei gas serra vede il settore del trasporto aereo alla ricerca costante di nuove tecnologie che possano ridurre l'impatto dei trasporti sull'ambiente. Come visto in precedenza, l'unica strada percorribile nel breve termine è quella dell'utilizzo dei biocarburanti per jet, poiché altre tecnologie come il motore elettrico o a idrogeno, sono attualmente in uno stato embrionale.

3.1 Stato dell'arte

La tecnologia che utilizza la biomassa come risorsa per la produzione di combustibile liquido è conosciuta da tempo, ma ha iniziato il suo reale processo di sviluppo nell'ultimo decennio e vede ampio margine di miglioramento nel futuro.

Si stima che i biocarburanti per l'aviazione hanno un potenziale di riduzione di CO₂ che può raggiungere l'80% durante l'intero ciclo di vita perché la biomassa, contendo carbonio, ha la capacità di riassorbimento della CO₂ (ICAO, 2021).

I biocarburanti per jet sono la migliore alternativa ai carburanti tradizionali a base di cherosene (CAF), poiché a differenza di altri possibili sostituti non necessitano di un adattamento o modifica del motore e del sistema di alimentazione degli aerei.

La necessità di prevedere l'utilizzo di carburanti drop-in¹ nell'aviazione commerciale è legata principalmente a due ragioni: la dimensione della flotta aerea e la vita media abbastanza lunga del mezzo che è di circa 20/25 anni.

¹ Un carburante è definito drop-in quando soddisfa le seguenti caratteristiche: non richiede modifiche ai motori dei sistemi-carburante degli aeromobili, possiede pressoché le stesse caratteristiche del cherosene tradizionale, non risultano limitazioni nelle prestazioni degli aeromobili, non è richiesta modifica dei sistemi di immagazzinamento e distribuzione a terra, può essere miscelato al cherosene tradizionale senza compromettere le caratteristiche finali del carburante.

Nel 2012 la flotta aerea era composta da circa 20.310 aerei commerciali e il prezzo minimo per ogni aereo era in media di 50M di dollari , la sostituzione dell'intera flotta avrebbe comportato un costo di circa un trilione di dollari e tempi dilatati nella sostituzione dell'intera flotta a causa della repentina crescita del mercato dell'aviazione. Infatti, per alcuni anni l'offerta di mercato ha riscontrato difficoltà ad inseguire la domanda. Inoltre, a queste problematiche si aggiunge la difficoltà di dover smaltire una quantità eccessiva di aeromobili dismessi. (J.I. Hileman, 2014)

Gli aspetti che guidano il potenziale sviluppo dei carburanti alternativi per jet sono tre: la sostenibilità economica, la sostenibilità ambientale e il perseguimento della diversità energetica.

Nello studio si evidenzia che gli unici carburanti attualmente sostenibili a livello economico ed ambientale sono quelli sintetici drop-in. I carburanti alcolici, il biodiesel e il biocherosene sono più adatti al trasporto via terra a causa di penalità energetiche e problematiche tecniche che si verificano ad alta quota.

I combustibili criogenici, idrogeno o gas naturale sono problematici per l'aviazione perché necessitano di nuovi motori così come anche il gas naturale liquefatto (GNL) a cui si aggiunge la necessità di creare anche una nuova infrastruttura per la distribuzione.

3.2 Carburanti sostenibili

I biocarburanti sono di origine vegetale e pertanto provengono da fonti 100% rinnovabili, ma non sono tutti uguali. Una prima distinzione li divide in due categorie, quelli di prima e quelli di seconda generazione.

I carburanti di prima generazione (1G) sono quelli che utilizzano materie prime provenienti da colture agricole ed utilizzano come materia prima il mais, la soia, le barbabietole da zucchero, la canna da zucchero o altri oli vegetali.

Questi carburanti riscontrano problematiche di carattere etico ed ambientale, la coltivazione di materie prime per la produzione di biomassa potrebbe aumentare la

deforestazione dei terreni implicando una riduzione dell'assorbimento di CO₂. A questo aspetto si aggiunge la possibilità che alcuni terreni destinati alle colture alimentari vengano destinati alla produzione di carburante con conseguente aumento del prezzo della materia prima destinata al commercio alimentare. Si potrebbe utilizzare come materia prima alimentare solo quella di scarto, ma in quel caso il quantitativo sarebbe molto ridotto al fine del soddisfacimento della domanda.

I carburanti di seconda generazione (2G), non provengono da materie prime da colture agricole, ma dal legno o dalla cellulosa. Essi conservano le caratteristiche positive dei biocarburanti di prima generazione e ne migliorano quelle negative. Non si riscontrano problematiche relative all'utilizzo del terreno e all'aumento dei prezzi delle derrate alimentari. Per quanto riguarda il problema della deforestazione esso non si pone perché si utilizza il legno, ma proveniente da materiali di scarto. Attualmente la ricerca sui materiali ligneo-cellulosi per la produzione di biojet sta proseguendo, si cercano nuove materie prime e nuovi possibili percorsi di conversione.

Affinché un carburante sostenibile (SAF) possa essere utilizzato nell'aviazione commerciale deve essere certificato drop-in dall'ASTM (American Society for Testing and Materials), il più grande ente di normalizzazione al mondo su base volontaria. Esso è tra i maggiori contributori delle ISO ed ha attualmente il monopolio della definizione dei materiali e dei metodi dell'industria petrolifera e petrolchimica mondiale.

Nello specifico, lo standard ASTM D-7566, è dedicato al settore aeronautico civile e definisce i requisiti minimi che deve avere un carburante contenente idrocarburi sintetizzati, gli additivi accettabili per l'utilizzo e il livello massimo di miscelazione con il carburante tradizionale, perché le materie prime e i processi di produzione dei SAF non possiedono le stesse proprietà e la stessa gamma di molecole del CAF e per questa ragione non possono essere utilizzati puri al 100%.

La norma è pensata per il settore civile, ma può anche essere applicata al settore militare o governativo.

La specifica ASTM D-7566 amplia le norme preesistenti relative ai carburanti tradizionali (ASTM International D1655, 1942)

Per supportare le operazioni degli aeromobili i carburanti per jet includono un punto di congelamento di -40°C e un limite di viscosità di $8\text{ mm}^2/\text{s}$ a -20°C , a causa delle temperature critiche raggiungibili in alta quota. Quindi, il carburante per jet necessita di uno standard specifico che si differenzia dai carburanti di trasporto su terra.

Lo standard ASTM D-7566 ha attualmente approvato 7 percorsi di conversione per la produzione di biocarburanti. Gli ultimi due percorsi sono di recente approvazione e risalgono al 2020. Nello standard sono evidenziate le materie prime utilizzabili e il rapporto massimo di miscelazione per ogni percorso. Per poter essere utilizzato nell'ambito del Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA) dell'ICAO, il SAF deve anche soddisfare i criteri di sostenibilità² definiti dall'Organizzazione.

3.3 Percorsi di conversione

- PERCORSO FT-SPK: gas di sintesi cherosene paraffinico sintetizzato Fischer-Tropsch (2009)

Materie prime: Rifiuti solidi urbani (MSV), rifiuti agricoli e forestali, legno e colture energetiche.

Processo: Si tratta di una reazione chimica catalizzata in cui le materie prime vengono convertite nel gas di sintesi syngas. La materia prima viene gassificata ad alte temperature (da 1200 a 1600 gradi Celsius) e separata e pulita dalle impurità per ottenere syngas puro che viene poi convertito in cera a catena di carbonio lunga attraverso il processo di sintesi FT. La cera viene poi spaccata e isomerizzata per produrre carburante liquido drop-in essenzialmente identico alle paraffine del Jet Fuel a base di petrolio, ma il processo FT non produce tipicamente le ciclo-paraffine e i composti aromatici che si trovano nel carburante tradizionale.

² <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/CORSIA-Eligible-Fuels.aspx>

Livello massimo di miscelazione con il combustibile tradizionale: 50%

- PERCORSO HEFA-SPK: cherosene paraffinico sintetizzato, idrotrattamento di esteri e acidi grassi (2011)

Materie prime: sostanze lipidiche che provengono da grassi, oli vegetali e animali (FOG) come acidi grassi o esteri di acidi grassi.

Processo: gli oli subiscono una reazione di deossigenazione seguita dall'aggiunta di idrogeno, così da scomporre i composti grassi in idrocarburi. Attraverso l'isomerizzazione si giunge al componente sintetico pronto alla miscelazione con Jet Fuel tradizionale.

Livello massimo di miscelazione con il combustibile tradizionale: 50%

- PERCORSO HFS-SIP: zuccheri fermentati idrotrattati in isoparaffine sintetiche (2014)

Materie prime: zuccheri

Processo: gli zuccheri vengono fatti fermentare con l'utilizzo di lieviti modificati. La fermentazione produce una molecola di idrocarburo C₁₅ chiamata Farnesene, che dopo l'idrotrattamento, può essere usata come materia prima per il Jet Fuel.

Livello massimo di miscelazione con il combustibile tradizionale: 10%

- PERCORSO FT-SPK/A: Power-to-liquids (PtL) cherosene paraffinico Fischer-Tropsch con aromi (2015)

Materie prime: rifiuti solidi urbani (MSV), rifiuti agricoli e forestali, legno e colture energetiche. (Come FT-SPK)

Processo: utilizza il processo di sintesi FT come descritto in precedenza, ma integra l'alcolizzazione di aromatici leggeri come ad esempio il benzene. Questo consente di

creare una miscela di idrocarburi con composti aromatici che riducono le perdite di carburante negli aerei.

Livello massimo di miscelazione con il combustibile tradizionale: 50%

- PERCORSO ATJ-SPK: Alcool al cherosene paraffinico sintetizzato a getto (2016)

Materie prime: Alcoli provenienti da qualsiasi fonte, ma in genere provengono dalla fermentazione di amidi o zuccheri provenienti a loro volta da (mais, canna da zucchero, barbabietole da zucchero, tuberi) o da biomassa cellulosica.

Processo: Disidratazione dell'isobutanolo o dell'etanolo seguita da oligomerizzazione, idrogenazione e frazionamento per produrre un componente idrocarburico per la miscelazione del Jet Fuel.

Livello massimo di miscelazione con il combustibile tradizionale: 50%

- PERCORSO CH-SK o CHJ: cherosene sintetizzato idrotermolisi catalitica (2020)

Materie prime: acidi grassi ed esteri di acidi grassi, o più in generale vari lipidi provenienti da grassi vegetali e animali, oli e grassi (FOG).

Processo: Cherosene sintetizzato idrotrattato contenente paraffine normali, iso-paraffine, cicloparaffine e composti aromatici prodotti dalla conversione idrotermale di esteri di acidi grassi e acidi grassi liberi insieme a qualsiasi combinazione di idrotrattamento, idrocracking o idroisomerizzazione e altri processi di raffinaria convenzionali, ma compreso il frazionamento come fase finale del processo.

Livello massimo di miscelazione con il combustibile tradizionale: 50%

- PERCORSO HC-HEFA-SPK cherosene paraffinico sintetizzato da esteri e acidi grassi idrocarburici (2020)

Materia prima: alga *Botryococcus branuii*

Processo: gli idrocarburi bioderivati (polimeri costituiti da atomi di idrogeno e carbonio, principalmente da piante) e i lipidi sono esposti all'idrogeno per la rimozione di ossigeno e altre impurità. Gli idrocarburi vengono ridotti in molecole più piccole (processo di cracking) con una diversa struttura atomica (processo di isomerizzazione) che dà luogo al SAF.

Livello massimo di miscelazione con il combustibile tradizionale: 10%

Tra queste tecnologie è necessario menzionare anche il percorso HTL (non ancora certificato ASTM) basato sulla pirolisi e la liquefazione idrotermale di materie prime come: biomassa lignocellulosica (non alimentare), rifiuti organici, fanghi, letame, torba, alghe, così come i carboni di bassa qualità. Questo processo produce un biocrudo che può essere migliorato sino a farlo diventare un combustibile. Secondo alcuni studi questa tecnologia risulta in fase di scalabilità in quanto potrebbe potenzialmente produrre il più basso costo di mitigazione del carbonio tra i biojet attualmente disponibili (200 \$/t CO_{2eq}) considerando il costo del petrolio medio pari a 45 \$/bbl (De Jong, 2017). Per problemi di disponibilità della materia prima il percorso HTL non riesce ad affrontare i test per ricevere la certificazione ASTM, che potrebbe essere disponibile solo a partire dal 2030.

3.4 Disponibilità

Nonostante i vari percorsi certificati visti nel paragrafo precedente, solo il percorso HEFA è attualmente commercializzato. La disponibilità, il costo e la sostenibilità complessiva della materia prima per questo percorso saranno una preoccupazione costante. Le problematiche principali sono legate ai costi delle materie prime e alle emissioni legate all'approvvigionamento e alla modifica di utilizzo dei terreni. Le altre tecnologie per la produzione di Biojet sono da definirsi ancora in fase di sviluppo.

Tendenzialmente il Biojet viene prodotto nelle raffinerie in co-produzione, ma è difficile che si vada oltre il 15% rispetto al volume totale (IRENA, 2019). Questa percentuale potrebbe aumentare con politiche favorevoli.

La capacità complessiva del combustibile HEFA presso le principali aziende mondiali è di circa 6,3 miliardi di litri all'anno, l'ICAO stima una capacità complessiva delle bioraffinerie pari a 8 miliardi di litri all'anno entro il 2032 (IRENA, 2021). Le principali materie prime utilizzate sono: olio vegetale, olio da cucina usato (UCO), grasso animale, sego grezzo, oli non commestibili e rifiuti. Per quanto riguarda l'Europa, la produzione potenziale di biojet è pari a 1684 kt/y e nello specifico l'Italia conta 375 kt/y in cui il principale operatore è l'ENI con una capacità di lavorazione installata al 2020 di 1MT.

La produzione di Biojet nel 2019 è stata di circa 140 milioni di litri (IRENA, 2021), con un incremento sostanziale nel giro di 10 anni (*Figura2*), ma nonostante questo aumento considerevole, la percentuale di Biojet rispetto ai combustibili tradizionali è inferiore all'1%. Inoltre, fino al 2019 solo 9 aeroporti in tutto il mondo fornivano regolarmente le miscele sostenibili, attualmente invece sono 45 gli aeroporti che forniscono in maniera continuativa le miscele ed è possibile osservare un aumento considerevole dei punti di distribuzione a partire dal 2021. In generale questi aeroporti sono localizzati principalmente in Europa e negli Stati Uniti.

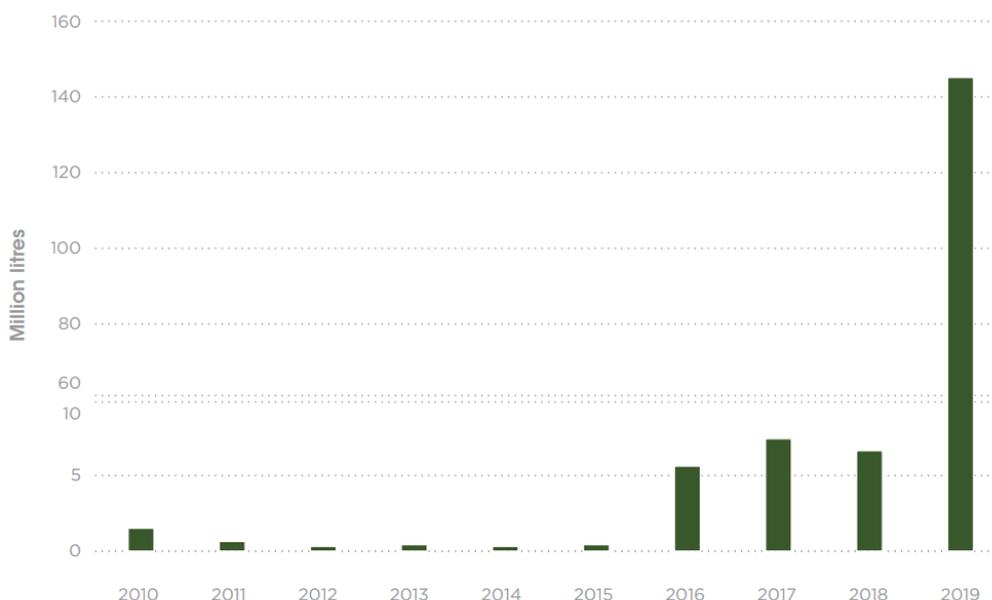


Figura 2-Produzione di Biojet Fuel dal 2010 al 2019. FONTE: IRENA analysis based on Dickson (2019)

Gli obiettivi climatici per il 2050 prevedono una riduzione del 90% delle emissioni nel settore del trasporto aereo, ma secondo lo studio di (Mark D.Staples, 2018) la massima riduzione di carbonio a cui si potrebbe giungere entro quella data è del 68%. Questo sarebbe possibile se si riuscissero a produrre 850 Mt/anno di biocarburante, ma per ottenere questo risultato sarebbe necessaria una quantità di energia pari a 178,7 extra joule all'anno proveniente da diverse materie prime, ma sarebbe necessario dirottare anche la materia prima già destinata alla produzione di bioenergia e ad altre applicazioni perché la disponibilità dello scenario analizzato è di solo 150,1 EJ/anno. Inoltre, sarebbe necessario incrementare il numero di bioraffinerie di 265 all'anno, per un totale di 8061 nel 2050.

4 REVISIONE DELLA LETTERATURA

Molti sono gli studi che si concentrano sulla valutazione della sostenibilità economica dei biocarburanti nel medio-lungo termine. Essi utilizzano ipotesi o metodologie differenti, ma la maggior parte sono basati su ipotesi perché, come specificato in precedenza, solo il percorso HEFA è in fase di commercializzazione.

Per valutare a pieno la sostenibilità economica di un carburante è necessario tener conto dei costi indiretti che genera sull'ambiente e quindi valutare la sua sostenibilità ambientale attraverso la valutazione del trade off costo-efficienza.

4.1 L'intensità di carbonio dei biocarburanti

L'ICAO nel 2019 ha pubblicato dei valori predefiniti di intensità di carbonio per le diverse tecnologie di conversione e materie prime, questi valori sono utilizzati in letteratura per le valutazioni economiche dei percorsi. Il valore considera le emissioni dell'intero ciclo

di vita del combustibile (LCA di base) più il cambiamento di uso del suolo IULC. I confronti vengono fatti prendendo come valore di riferimento per il combustibile tradizionale 89 gCO₂e/MJ.

Per il percorso HEFA, risultano più basse le emissioni per i processi che utilizzano materia prima di scarto: UCO (13,9 gCO₂e/MJ), olio di mais (17,2gCO₂e/MJ), distillato di acidi grassi di palma (20,7 gCO₂e/MJ) e sego (22,5 gCO₂e/MJ). Per gli alti abbiamo valori molto più alti: l'olio di soia (USA) (64,9 gCO₂e/MJ)-Brasile (67,4 gCO₂e/MJ), olio di colza (UE) (71,5 gCO₂e/MJ). Per quanto riguarda l'olio di palma la situazione è differente e va discussa nello specifico perché in base alla tecnologia utilizzata per la produzione l'intensità di carbonio può risultare inferiore o superiore a quella del cherosene, con un sistema a stagno aperto si stimano 99,1 gCO₂e/MJ che è un valore superiore rispetto a quello del carburante tradizionale, con un sistema a stagno chiuso la situazione migliora con 76,5 gCO₂e/MJ. Nonostante l'olio di palma sia la materia prima più economica, le compagnie aeree si rifiutano di utilizzarla per i problemi di sostenibilità appena visti (AIE Bioenergia 2021). Nel frattempo sono in fase di sviluppo altre materie prime che non entrano in competizione con il cibo e sono: la Brassica carinata, Camelina sativa, Pennycress, Salicornia, tabacco, pongamia, jatropha.

Per quanto riguarda la sintesi FT, essa ha i valori più bassi in assoluto, raggiungendo in casi specifici anche valori negativi; i residui agricoli contano 7.7 gCO₂e/MJ, i residui forestali 8.3, per i rifiuti solidi urbani (MSW) dipende dal contenuto biogenico dei rifiuti, con MSW del 100% di carbonio biogenico si raggiunge un valore di 5,2 gCO₂e/MJ. Per quanto riguarda il percorso ATJ i valori sono i seguenti: 29,3 (residui agricoli), 23,8 (residui forestali), -10,7 (Miscanthus - USA), e 12,4 (miscanto - UE). È intuibile che se si utilizzasse energia rinnovabile per la produzione, la riduzione delle emissioni potrebbe essere ancora maggiore. Per quanto riguarda il percorso SIP la riduzione delle emissioni è intermedia infatti si registrano rispettivamente per la canna da zucchero e la barbabietola da zucchero i seguenti valori 44,1 e 52,6 gCO₂e/MJ. Per gli altri percorsi l'ICAO non ha attualmente ancora definito dei valori standard di emissione. (ICAO, 2019).

Le vie di conversione basate su residui o colture lignocellulosiche producono basse emissioni di gas serra, indipendentemente dal metodo di assegnazione. Il percorso FT

mostra la più alta riduzione delle emissioni di gas serra (86-104%) seguita da HTL (77-80%), pirolisi (54-75%), HEFA a base di UCO (68%) e canna da zucchero (71-75%) e ATJ a base di stoppe di mais (60-75%) (De Jong, 2017)

4.2 Sostenibilità economica dei percorsi

Le analisi economiche si basano principalmente sul calcolo del VAN dei vari percorsi di conversione con l'obiettivo di calcolare il Minimum selling price (MSP) o altri parametri.

Nello studio di (Rafael S. Capaz, 2020) si analizzano 12 differenti percorsi di conversione, alcuni di prima generazione ed altri di seconda prendendo in esame tutto il processo, dall'approvvigionamento delle materie prime agli intermediari sino alla raffineria finale:

- Percorso HEFA per soia, palma, UCO e sego di manzo (G1)
- Percorso ATJ per la canna da zucchero (G1), residui di canna da zucchero (G2) e residui lignocellulosici (G2) gas di scarico dell'acciaio (G2),
- Percorso FT per la canna da zucchero (G1) e residui lignocellulosici (G2)
- Percorso HTL per i residui di canna da zucchero (G2) e i residui lignocellulosici (G2)

I dati economici relativi ai vari percorsi sono stati presi da differenti fonti presenti in letteratura, tenendo anche conto di alcune possibili situazioni di co-produzione.

Nello studio si calcola l'MPS di tutti i percorsi e il costo di mitigazione del carbonio in USD₂₀₁₉.

Gli MPS dei SAF variano nel seguente intervallo (26,7-44,6 USD GJ⁻¹), e non risultano competitivi con il cherosene fossile che ha un prezzo medio di 15,8 USD GJ⁻¹.

I costi di mitigazione del carbonio vanno da 185 USD tCO_{2e}⁻¹ (UCO/HEFA) sino a picchi di 1470 USD tCO_{2e}⁻¹ per il percorso ATJ con canna da zucchero. Questi costi non sono neanche lontanamente paragonabili al costo attuale del carbonio (1,02-3,13 USD tCO_{2e}⁻¹) o anche di quelli futuri stimati (5,90-55,2 USD tCO_{2e}⁻¹). In generale, però dallo

studio si evidenzia che con costi moderati che si aggirano tra i 185-326 USD tCO_{2e}⁻¹ si potrebbe riuscire ad ottenere una riduzione del 25% di CO₂.

Nello studio di (Nikita Pavlenko, 2019) si analizza il rapporto COSTO/EFFICIENZA dei differenti percorsi di conversione in Europa cercando di comprendere quali politiche potrebbero essere utili per incentivare i produttori ad investire nelle tecnologie e alle compagnie aeree ad utilizzare i biocarburanti. Nello studio sono analizzati i primi cinque percorsi certificati drop-in dall'ASTM (HEFA, FT-SPK, PTL, ATJ, SIP). Il primo punto dello studio è sempre quello di calcolare l' MSP attraverso il calcolo del flusso attuale netto.

Per il calcolo delle emissioni del ciclo di vita si includono le emissioni dirette attribuibili alla produzione, al trasporto e all'uso del combustibile e le emissioni indirette dovute al cambio di impiego del terreno (ILUC).

I risultati dello studio mostrano un costo livellato per HAEFA di 0.88-1.9 a seconda della materia prima utilizzata, il percorso ha un capex basso, ma i costi della materia prima sono molto alti, quasi la metà dell'intero costo di produzione.

Il secondo meno costoso è la gassificazione FT con una media di 1.34 e 1.87 euro per litro. Il valore è dato principalmente da capex alto e basso costo delle materie prime.

Il processo SIP presenta costi molto elevati a causa dell'energia rinnovabile che in Europa è molto costosa, quindi se si producesse altrove, non in Europa, probabilmente i costi sarebbero ridotti.

Per gli ATJ, il costo cambia principalmente in base alla materia prima e alla resa.

I risultati di questo studio sono abbastanza in linea con (Seamus J.Bann, 2017) tranne che per quanto riguarda il SIP, in cui si stimava un costo medio di 1.75 euro al litro, perché considerava rendimenti poco realistici. L'analisi di sensibilità riconferma i risultati visti sopra, ma pone il percorso FT dei rifiuti urbani tra i più convenienti. I costi sono attualmente non sostenibili perché superiori alla media del prezzo del petrolio.

Nello specifico, nello studio di (Seamus J.Bann, 2017) viene effettuata l'analisi del VAN di diversi percorsi di conversione sulla base della bibliografia del settore. Prendendo in considerazione solo i percorsi attualmente certificati tra quelli esaminati (HEFA e FT) è

stata calcolata la probabilità di avere VAN positivo tenendo conto nel calcolo di una serie di incertezze: investimenti di capitale, costi operativi, rendimento del combustibile, energia, politica. HEFA ha dimostrato la più alta probabilità di NPV positivo con una probabilità del 27,7%, 14,8% e 8,6% per grasso giallo, sego e olio di soia, rispettivamente. HEFA e FT hanno mostrato l'MSP medio più basso e il VAN meno negativo rispetto a tutti i percorsi analizzati a causa di una combinazione di fattori: nel caso HEFA, i bassi requisiti di investimento di capitale e gli alti rendimenti del carburante hanno superato i costi relativamente elevati delle materie prime. Lo studio ha inoltre mostrato anche l'andamento delle probabilità di VAN positivo con l'introduzione della politica di condivisione del credito (dal 25 al 100%) e il RIN³ ((Renewable Identification Numbers), è chiaro che all'aumentare della percentuale di condivisione del credito aumenta la probabilità di VAN positivo.

Di seguito una rassegna degli MPS, espressi in \$ a tonnellata, tratti dalla letteratura per i vari percorsi di conversione e le diverse materie prime.

HEFA:

- (825-1550\$) basato sul grasso giallo,
- (\$988-1775) basato sul sego
- (\$1086-2000) basato sull'olio di soia

In questo percorso, la materia prima ha un costo sul totale di circa l'80%

FT:

- (\$1188-1738) rifiuti solidi urbani
- (\$2124-3127) residui forestali
- (\$1982 e \$1244) paglia di grano da salice
- (\$898-1724) materia prima da biomassa
- (\$635-1245) materia prima da rifiuti

³ Il RIN è un numero di serie assegnato a un lotto di biocarburante allo scopo di tracciarne la produzione, l'uso e il commercio come richiesto dal Renewable Fuel Standard (RFS) dell'Agenzia per la protezione ambientale degli Stati Uniti implementato secondo l'Energy Policy Act del 2005 e l'Energy Independence and Security Act del 2007. Possono essere venduti separatamente dal biocarburante e sono validi solo per soddisfare gli obblighi per l'anno di conformità in corso o l'anno di conformità successivo.

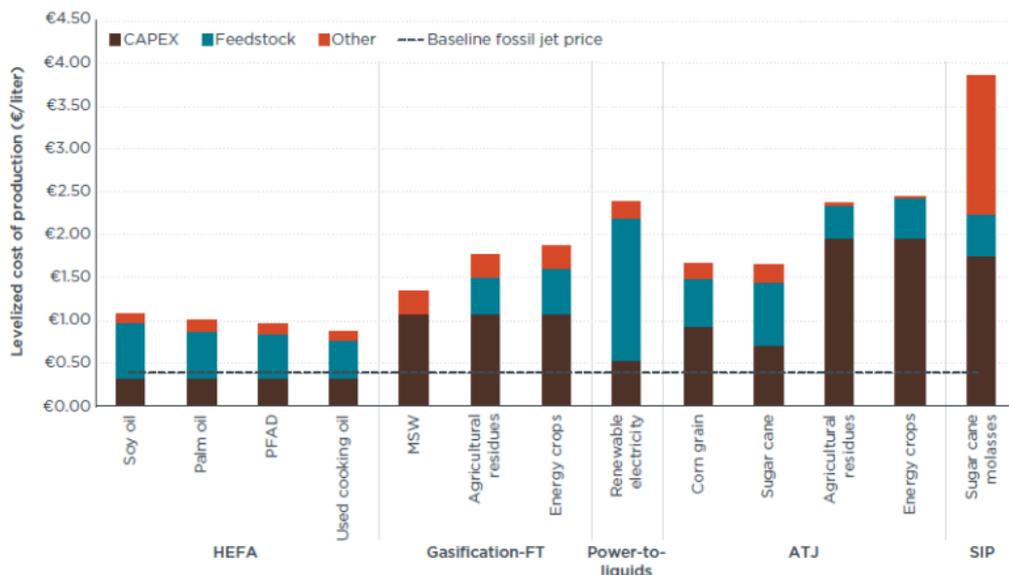
Questo percorso è caratterizzato da alti rendimenti di carburante, materie prime quasi gratuite e investimenti di capitale relativamente bassi.

ATJ:

- \$938 intermedio di etanolo
- (\$736-1113) intermedio di isobutanolo basato sullo zucchero
- \$976 frumento di mais
- \$1564 frumento di mais con substrato di paglia
- \$1387 etanolo a getto basato sul grano di mais
- \$1773 etanolo a getto usando le stoppie di mais,
- \$1200 per la canna da zucchero a etanolo
- (\$2832-4130) lignocellulosa a etanolo

(Brown, 2020) (Seamus J.Bann, 2017) (Neuling, 2018). (de Jong, 2017) (Geleynse, 2018). (Tao, 2017) (Guolin Yao, 2017).

Tutti gli altri percorsi certificati drop-in risultano attualmente completamente fuori mercato. In generale, un SAF può arrivare a costare anche 10 volte in più rispetto ad un carburante tradizionale (*Figura 3*).



Total, Flying Green, 2019; Beginner's guide to SAF, 2017;

Figura 3-Prezzo medio in euro/litro dei diversi percorsi di conversione

Considerando che il prezzo medio del Jet Fuel nel 2021 è stato di \$77.6/bbl secondo il Jet Fuel price monitor dello IATA e che una tonnellata di petrolio corrisponde a circa 6,841 barili, il prezzo medio per una tonnellata di Jet Fuel tradizionale è di circa 530\$, questo prezzo è chiaramente inferiore a qualsiasi MPS calcolato negli studi sopra citati.

4.3 Sostenibilità delle politiche economiche

La letteratura economica che analizza la riduzione di CO₂ nel settore del trasporto aereo si focalizza sull'applicazione di due politiche principali: l'introduzione di una quota di SAF e l'introduzione di una tassa sul carbonio (Carbon tax) e le confronta tra di loro.

Gli studi esistenti sull'introduzione dei SAF nell'aviazione si concentrano principalmente sulla proiezione futura della domanda e sul potenziale contributo di riduzione delle emissioni che l'introduzione dei carburanti sostenibili può apportare. (Chiaramonti, 2019). Uno studio condotto dal Politecnico di Torino e JRC ha definito dei possibili volumi di domanda di Jet Fuel in Europa sulla base di una meta analisi condotta su differenti studi. Nell'analisi sono evidenziati tre possibili livelli di domanda in due possibili scenari (*Figura 4*). Lo scenario (a) evidenzia i risultati per il settore dell'aviazione e il valore normalizzato dello scenario MAIN 2030 è pari a 1,8 MTOE in termini assoluti, lo scenario (b) evidenzia i risultati per il settore dell'aviazione quando si tiene conto dei mandati degli Stati membri. Il valore normalizzato dello scenario MAIN 2030 è pari a 5,9 MTOE in termini assoluti (Chiaramonti D. T., 2021)

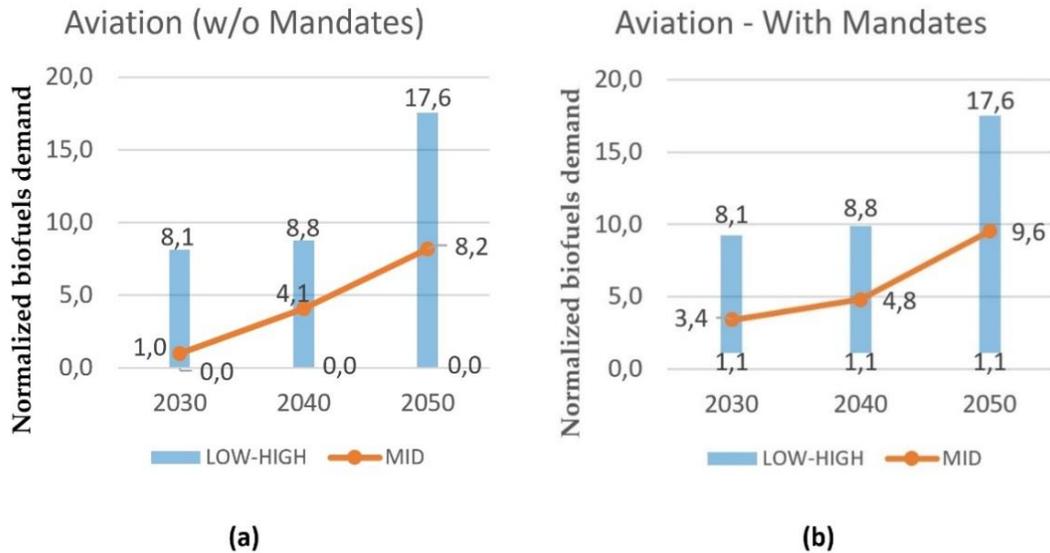


Figura 4-Previsione della domanda di biocarburante nel settore del trasporto aereo in MTOE. Tratto da: Chiamonti, D., Talluri, G., Scarlat, N., & Prussi, M. (2021). The challenge of forecasting the role of biofuel in EU transport decarbonisation at 2050: A meta-analysis review of published scenarios. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 139, 110715.

L'attuazione di una politica di tipo CORSIA potrebbe stimolare la domanda e la produzione di SAF, riducendo al contempo la crescita dei viaggi aerei aumentandone le tariffe. Inoltre, il prezzo dei carburanti per l'aviazione a base di petrolio seguito dal tasso di crescita del prezzo del carbonio sono i due fattori più importanti per determinare se la politica di tipo CORSIA può portare al raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità. La probabilità di ridurre le emissioni del 32-50% grazie al CORSIA è del 3.5%. (Hsun Chaoa, 2019)

Molti studi presenti in letteratura sostengono che con l'introduzione dell'ETS, il settore dell'aviazione avrebbe acquistato all'esterno molte quote e riversato totalmente il prezzo di queste ultime sui passeggeri. Per questa ragione, la riduzione delle emissioni sarebbe stata solo la diretta conseguenza della riduzione della domanda. Tuttavia, i prezzi previsti per le quote avevano valori molto bassi o erano gratuite. Pertanto, la riduzione della domanda rispetto ad uno scenario business-as-usual (+4% di crescita annuale dei passeggeri) variava dal -0,1% al -1,3% e nel caso dei voli low cost la riduzione poteva arrivare al -3%. Un recente studio dimostra che l'effetto dell'ETS, anche avendo un'elasticità simile a quella appena vista, non risulta significativa e si può quindi

concludere che il sistema ETS dell'UE non ha finora avuto alcun effetto significativo sulla domanda e quindi sul traffico passeggeri, mentre la tassa sull'aviazione mostra dalle analisi di regressione comprovati effetti negativi sul traffico passeggeri. (Katrinoesingmann, 2022)

Al contempo, la letteratura che analizza la tassa sul carburante o sulle emissioni di carbonio sostiene che la tassa ha un effetto diretto comprovato nella riduzione delle emissioni di CO₂, ma che questo non esclude la presenza di altrettanti effetti indiretti rilevanti che indeboliscono inevitabilmente quelli diretti. (Changmin Jiang, 2021)

Gli effetti indiretti possono essere i seguenti:

1. L'effetto sostituzione tra aereo e macchina, questo implica una diminuzione delle emissioni del settore aereo, ma un aumento di quello automobilistico (Christian Hofera, 2010)
2. L'introduzione della tassa sul carbonio in territorio ristretto (Es. Regno Unito) può aumentare la tendenza dei passeggeri ad effettuare viaggi di lunga percorrenza che sfuggono alla tassa ed hanno prezzi più bassi. Questo potrebbe comportare una riduzione netta di CO₂ non rilevante. (Karen Mayora, 2007)

Lo studio di (Changmin Jiang, 2021) mette a confronto le due alternative per valutare quale sia più conveniente e stimolante.

Nello studio sono stati costruiti due modelli, il primo per la minimizzazione delle emissioni e il secondo per l'ottimizzazione del benessere sociale. Il modello economico è stato effettuato attraverso delle assunzioni semplificative.

Si suppone, per semplicità, l'assenza di compagnie aeree simmetriche sul mercato, che offrono prodotti indifferenti e che competono alla Cournot. È stata definita la funzione di profitto delle compagnie aeree e quella che definisce l'assistenza sociale.

Dall'analisi del modello si deduce che potrebbe non essere socialmente efficiente spingere la quota obbligatoria di SAF quando SAF è ancora costoso da produrre e il prezzo del TAF è sufficientemente stabile. La convenienza del SAF rispetto alla tassa sul carbonio aumenta al diminuire del prezzo, infatti, quando l'obiettivo delle politiche è massimizzare il benessere sociale, il livello di emissione è più alto sotto la Carbon tax che

sotto la quota SAF se il prezzo SAF è sufficientemente basso. Tuttavia, maggiore è il costo delle emissioni, maggiore è la probabilità che il livello di emissione si riduca sotto la Carbon tax rispetto alla quota SAF. Se però non vi è incertezza nel prezzo del TAF la tassa sul carbonio porta ad un benessere sociale maggiore rispetto alla quota del SAF.

Dall'analisi si può dedurre che la Carbon Tax è una politica che dà buoni risultati con riduzioni di carbonio non troppo elevate al contrario della quota di SAF che può avere un impatto ambientale più elevato, ma solo se è possibile prevedere una considerevole riduzione del prezzo delle tecnologie rispetto ai prezzi attuali, altrimenti si avrebbero ripercussioni sul benessere sociale.

La Commissione Europea (Commissione Europea, 2021) propone un elenco di misure politiche che possono contribuire a ridurre il divario di prezzo tra il Jet Fuel tradizionale e i SAF, le misure proposte sono strutturate intorno al requisito normativo dell'obbligo di miscelazione dei SAF. L'obiettivo è quello di rendere possibile il raggiungimento degli obiettivi del piano "Fit for 55" entro il 2050.

Le misure possono essere applicate con diverse opzioni:

A1. Obbligo sul lato dell'offerta (volume di SAF)

A2. Obbligo sul lato dell'offerta (Riduzione dell'intensità di CO₂)

B1. Obbligo sul lato della domanda (ambito intra che extra UE)

B2. Obbligo sul lato della domanda (ambito Ue)

C1. Obbligo sull'offerta e sul rialzo (approccio basato sul volume)

C2. Obbligo sull'offerta e sull'innalzamento (approccio basato sulla riduzione dell'intensità di carbonio).

Nell'opzione A2 e C2 è prevista in aggiunta l'introduzione di quote obbligatorie di carburanti RFNBO⁴. Per eliminare il divario di prezzo tra gli RFNBO e i biocarburanti

⁴ Idrogeno e carburante sostenibile di origine non biologico
(https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/974822/targeting-net-zero-rtfo.pdf#page=41)

avanzati è stato introdotto un moltiplicatore. Il moltiplicatore scelto diminuisce negli anni (1.6-1.2) per consentire alla tecnologia di svilupparsi e ridurre i suoi costi.

Tutte le opzioni, sono state studiate per ottenere la stessa riduzione di quantità di carbonio entro il 2050 tranne la B2, in cui il campo ristretto della sua applicazione vincola il raggiungimento degli obiettivi.

Il mandato di miscelazione obbligatoria rende irrilevante il divario di prezzo tra il Jet Fuel tradizionale e quello miscelato con SAF, in quanto il Jet Fuel fossile non sarà più disponibile in commercio, ma ci sarà solo quello miscelato. Il prezzo aumenterà, ma non sarà più un discriminante di scelta che inibisce l'acquisto del SAF.

Secondo la commissione europea un livello di SAF che va dal 4 e dell'8% è sostenibile entro il 2030. Questo valore scaturisce dalla valutazione dalle analisi economiche presenti in letteratura relative ai costi delle tecnologie di cui vi è una rassegna al paragrafo precedente e delle loro evoluzioni nel tempo. Un valore troppo elevato di quota SAF entro il 2030 non consentirebbe alle tecnologie di svilupparsi adeguatamente rendendo il costo del Jet Fuel troppo elevato, ma la situazione contraria farebbe ridurre troppo il prezzo delle quote di ETS riducendo l'incentivo allo sviluppo tecnologico.

I valori utilizzati per le valutazioni effettuate dalla Commissione Europea sono i seguenti:

Tabella 1- Ramp up SAF ipotizzata dalla Commissione Europea

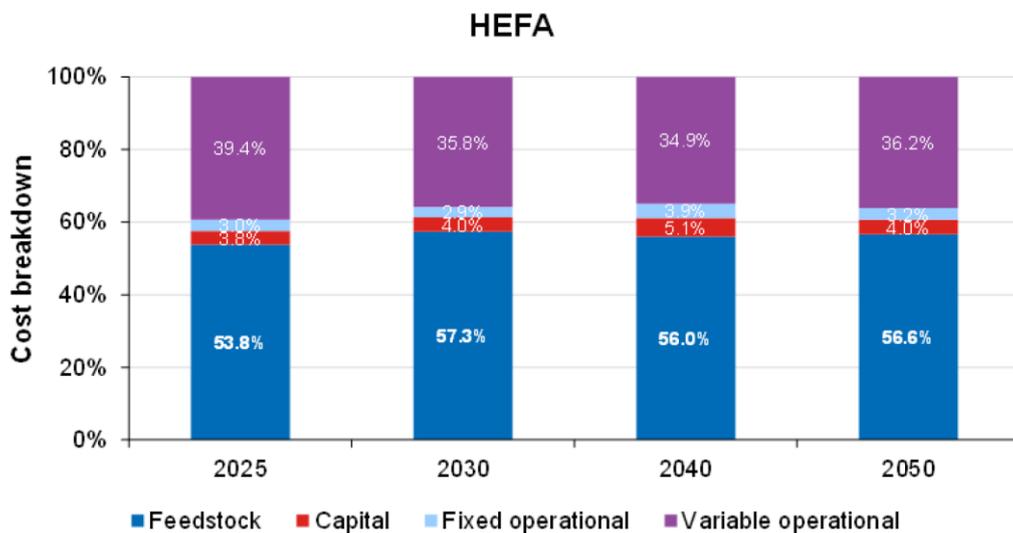
Total shares in the fuel mix (in %)	2025	2030	2035	2040	2045	2050
SAF ramp up out of which:	2	5	20	32	38	63
Biofuels (including Part A and Part B biofuels)	2	4.3	15	24	27	35
Specific sub-mandate on RFNBOs¹²⁹	-	0.7	5	8	11	28

Tabella 2-Riduzioni di CO2 con il ramp up ipotizzato dalla Commissione Europea

WTW jet fuel CO2 intensity reduction (in %)	2030	2040	2050
Resulting from the use of SAF	- 5%	- 29%	-59%

Nei primi anni l'obbligo dei SAF sarà soddisfatto quasi esclusivamente dall'HEFA e ATJ, ma con il passare del tempo il mix aumenterà all'aumentare delle quote di SAF obbligatorie. Il mix di carburante potrebbe variare da uno stato all'altro in base alla flessibilità di approvvigionamento. La riduzione di Jet Fuel tradizionale entro il 2030 è stimata come il 3% per l'opzione B2 e come il 7% per tutte le altre opzioni. Secondo la Commissione Europea, le materie prime per la produzione di SAF risultano sufficienti per soddisfare le quantità previste dalle varie opzioni. La diversificazione nel tempo dei processi di conversione consente, inoltre, di diversificare la materia prima.

Analizzando la possibile evoluzione nel tempo dei costi dei SAF, la Commissione europea sostiene che il percorso HEFA manterrà il suo costo pressoché invariato nel tempo poiché la tecnologia ha già un elevato livello di maturità e i costi di capitale sono solo il 4% (Figura 5) del costo di produzione totale e che quindi risulta minimo il cambiamento di prezzo dovuto alle economie di scala.



Source: PRIMES Biomass

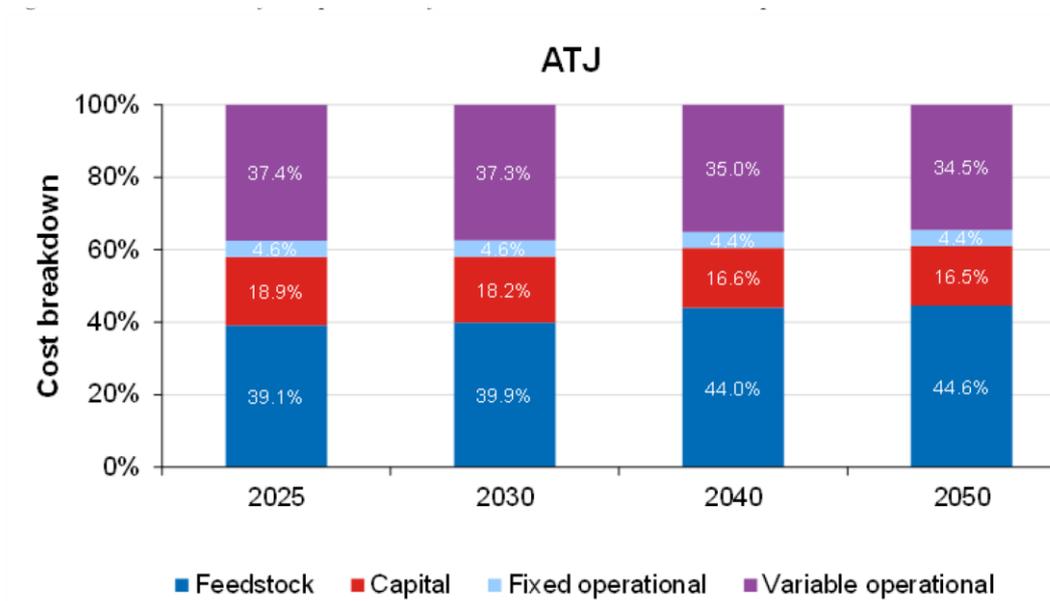
Figura 5-Struttura dei costi HEFA

Il costo attuale stimato del Jet Fuel HEFA è di circa 1050 euro a tonnellata e si prevede che raggiungerà il punto di pareggio entro il 2030, riuscendo ad avere un prezzo inferiore ai carburanti fossili del 16% entro il 2050.

Per quanto riguarda il percorso ATJ si prevede che i costi diminuiscano significativamente entro il 2035 sotto le opzioni elencate. Lo sviluppo degli ATJ è una conseguenza del fatto che dopo il 2030 la tecnologia HEFA non potrà soddisfare da sola tutta la produzione richiesta (carenza di materia prima). Il percorso ATJ (*figura 6*) è il secondo meno costoso rispetto alle altre tecnologie, ma ha un costo stimato di circa 2086 euro a tonnellata, le economie di scala indotte dalle opzioni tenderanno a ridurre il costo di capitale e i costi operativi che in un primo momento verranno controbilanciati dall'aumento dei prezzi delle materie prime. Si stima che entro il 2050 il costo degli ATJ scenderà da 2 a circa 1,7 volte il prezzo del carburante tradizionale.

Per il percorso FT si prevede che i prezzi rimangano costanti fino al 2040 e che a partire da questo periodo inizino a diminuire a causa delle economie di scala giungendo a stabilizzarsi nel 2050 a circa 1.7 volte il prezzo del carburante tradizionale.

In generale tutte le Opzioni aiutano a diminuire i costi di capitale e di produzione per effetto delle economie di scala che generano.



Source: PRIMES Biomass

Figura 6- Struttura dei costi ATJ

Grazie alle opzioni di prevede che gli RFNBO riescano ad introdursi nel mix di combustibili SAF già a partire dal 2030. Si prevede che nel 2030 il costo degli RFNBO sarà circa 2.6 volte superiore a quello dei combustibili fossili, ma che riesca a diminuire entro il 2050 a 1.5 volte a causa della diminuzione dei costi degli elettrolizzatori necessari per la produzione.

Va considerato che le proiezioni del modello considerano un margine di profitto del 10%, che non viene considerato negli attuali prezzi dei SAF presi dalla letteratura, pertanto le riduzioni potrebbero persino essere maggiori di quelle stimate.

Le opzioni stimolano gli investimenti nella tecnologia e di conseguenza aumentano le economie di scala e gli effetti di apprendimento diminuendo i costi di produzione dei SAF, ma non a tal punto da renderli competitivi.

Nella tabella sottostante sono elencati i prezzi medi delle miscele di Jet Fuel nello scenario di base e quello delle diverse opzioni.

Tabella 3-Prezzi medi delle miscele di Jet Fuel nello scenario di base e nelle opzioni politiche dell'UE

	2030 (€/toe)	Increase on baseline	2040 (€/toe)	Increase on baseline	2050 (€/toe)	Increase on baseline
Baseline	1028.4		1146.9		1246.1	
PO A1	1062.5	3.3%	1401.9	22.2%	1653.5	32.7%
PO A2	1060.2	3.1%	1393.0	21.5%	1651.4	32.5%
PO B1	1062.5	3.3%	1401.9	22.2%	1653.6	32.7%
PO B2	1033.8	0.5%	1195.1	4.2%	1332.6	6.9%
PO C1	1062.7	3.3%	1402.1	22.3%	1653.5	32.7%
PO C2	1060.5	3.1%	1393.1	21.5%	1651.2	32.5%

Source: Ricardo et al. Impact assessment support study; PRIMES Biomass and PRIMES-TREMOVE models, E3Modelling

Si prevede che i costi delle compagnie aeree aumenteranno da 14 milioni a 20 milioni nel periodo 2020-2040, ma l'aumento in termini di PIL rappresenta soltanto lo 0.01%.

Inoltre, è stato stimato anche l'impatto sui prezzi dei biglietti aerei sulla base delle seguenti ipotesi: il costo extra del carburante dovuto all'acquisto dei SAF è totalmente riversato sui viaggiatori e la quota del costo del carburante sul totale dei costi dell'aviazione è stato fissato al 25%.

Si stima che i costi dei biglietti aumenteranno nel seguente modo: 0.8% nel 2030, 5.4-5.6% nel 2040 e 8.1-8.2% nel 2050 e che il traffico aereo complessivo aumenterà rispetto al 2015 dell'80% con tutte le opzioni (esclusa la B2) che corrisponde ad un 5.2-5.3% in meno rispetto allo scenario di base. (Commissione Europea, 2021)

5 METODOLOGIA

L'analisi effettuata di seguito si concentra su degli aspetti che caratterizzano il mercato del trasporto aereo o lo influenzano. L'obiettivo è quello di comprendere quale sia la relazione, se esiste, tra l'andamento del traffico passeggeri e l'economia di un paese e capire in che misura il prezzo del petrolio e del Jet Fuel influenzano il settore. La riflessione sul prezzo nasce dall'intenzione di comprendere se l'introduzione dei biocarburanti nel settore del trasporto aereo è economicamente sostenibile nel medio-lungo termine.

5.1 Analisi econometrica

Lo studio della relazione che lega lo sviluppo economico di un paese con l'andamento del traffico passeggeri ed il prezzo del petrolio è stato condotto attraverso un'analisi di regressione mediante l'utilizzo di dati panel. La stima del modello di regressione, con i coefficienti e l'intercetta è stata effettuata con l'utilizzo del software Stata®.

Nello specifico l'analisi di regressione (*xtreg*) è stata effettuata con effetti fissi (*fe*).

Gli effetti fissi vengono utilizzati per controllare le variabili omesse nei dati panel quando esse variano tra le diverse entità, che nel caso in esame sono i Paesi, ma non nel tempo.

Il modello di regressione con effetti fissi è rappresentato dalla seguente formula:

$$Y_{it} = \beta_1 X_{k,it} + \beta_k X_{k,it} + \alpha_i + u_{it}$$

con $i = 1, \dots, n$ e $t = 1, \dots, T$ dove X_{1it} è il valore del primo regressore per l'entità i al tempo t , X_{2it} è il valore del secondo regressore e così via, $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ sono l'intercetta specifica per ciascuna entità e u_{it} è il termine di errore.

Inoltre, il termine α_i può essere scomposto a sua volta nel seguente modo:

$$\alpha_i = \beta_0 + \beta_2 Z_i$$

dove Z_i è una variabile inosservata che varia da uno stato a un altro ma non cambia nel tempo (può rappresentare, ad esempio, alcuni aspetti culturali). L'obiettivo è quello di stimare l'effetto su Y delle X , tenendo costanti le caratteristiche inosservate del Paese Z .

Nel caso di dati panel è opportuno utilizzare per le regressioni gli errori standard cluster (*vce(cluster country)*) che corrispondono all'estensione logica di quelli robusti all'eteroschedasticità per dati sezionali. Nella regressione con dati sezionali, gli errori standard robusti all'eteroschedasticità sono validi indipendentemente dal fatto che vi sia eteroschedasticità e allo stesso modo nella regressione con dati panel, gli errori

standard clustered sono validi indipendentemente dal fatto che vi sia eteroschedasticità e/o correlazione seriale. Il termine “clustered” deriva dal fatto che si consente correlazione in un “cluster ” ovvero in un gruppo di osservazioni (in una entità) ma non tra i diversi cluster.

6 DATI

I dati utilizzati nell’analisi si riferiscono a 51 paesi e ricoprono un arco temporale di 25 anni (dal 1996 al 2020).

Si è ritenuto opportuno restringere le analisi ad un sottoinsieme di Paesi specifico, che fosse omogeneo dal punto di vista dello sviluppo, in quanto il settore del trasporto aereo è mosso principalmente da paesi sviluppati e con economie forti, inoltre, la reperibilità e l'affidabilità dei dati relativi al trasporto aereo è nettamente maggiore per i paesi economicamente avanzati. I Paesi selezionati per lo studio sono quelli definiti “HIGH-INCOME”, nello specifico, la lista di riferimento utilizzata è quella stilata dalla World Bank per il corrente anno fiscale (2022). La Banca Mondiale, classifica le economie in 4 gruppi di reddito utilizzando i dati relativi al RNL⁵ pro capite espresso in dollari statunitensi utilizzando il metodo Atlas per smorzare le fluttuazioni dovute ai tassi di cambio. I paesi sono classificati ogni anno il 1° luglio, sulla base della stima del loro RNL pro capite per l'anno solare precedente e i gruppi di reddito rimangono fissi per l'intero anno fiscale della Banca Mondiale (cioè fino al 1° luglio dell'anno successivo), anche se le stime del RNL pro capite vengono riviste nel frattempo. È chiaro che l’RNL pro capite non riassume completamente il livello di sviluppo di un paese e non ne misura il benessere, ma è un indicatore utile perché strettamente correlato con altre misure non monetarie della qualità della vita come ad esempio il tasso di istruzione. Della lista HIGH-

⁵ Il reddito nazionale lordo (RNL) di un paese è una misura del reddito totale ricevuto da quel paese nel corso di un anno. La misurazione dell’RNL comprende tutti i produttori residenti insieme alle imposte associate non incluse nei dati sulla produzione e al reddito primario netto dall’estero.

Gli analisti usano l’RNL pro capite come indicatore del reddito medio di un cittadino in qualsiasi paese. Le cifre prodotte possono fornire un’indicazione dello stato economico generale di un paese e degli standard di vita generali dei cittadini.

INCOME della World Bank sono stati esclusi alcuni Paesi di cui non vi era disponibilità di dati in merito al traffico passeggeri, alcuni di questi Paesi non posseggono un aeroporto a causa del basso numero di abitanti o della loro collocazione geografica (piccole isole).

Le variabili utilizzate per i modelli econometrici sono 3: Passeggeri, Prezzo del petrolio, GDP (Constant price). Nel primo modello la variabile dipendente è Passeggeri mentre le variabili indipendenti sono Prezzo e GDP. Nel secondo modello la variabile dipendente è il Prezzo mentre le variabili indipendenti sono GDP e Passeggeri.

I dati utilizzati nelle analisi sono selezionati principalmente da banche dati che gestiscono dataset completi con tutti i paesi e con coperture temporali molto ampie (World Bank, EIA, IMF). Nello specifico, il database della World Bank è da considerarsi abbastanza completo negli ultimi 25 anni, infatti, la percentuale di missing value per la variabile passeggeri e GDP è molto bassa. Nel caso della variabile passeggeri la percentuale di missing value è di circa il 6%, mentre quella del GDP è molto più bassa ed è dell'1%. Proprio per evitare di avere un dataset poco completo si è ritenuto opportuno effettuare le analisi sull'arco temporale sopra indicato, la percentuale di missing value dei passeggeri aumentava in maniera rilevante nei periodi antecedenti al 1996.

6.1 Variabili

La variabile passeggeri indica il numero di persone che hanno effettuato viaggi nazionali o internazionali su vettori aerei registrati nel paese. I dati provengono dalla World Bank che aggrega due fonti differenti:

- International Civil Aviation Organization, che sulla base di direttive specifiche date ai vari paesi, raccoglie annualmente i dati relativi al traffico passeggeri e nel caso di vettori non dichiarati effettua delle stime, dove possibile queste stime si basano su informazioni pubblicate dai vettori stessi.
- Civil Aviation Statistics of the World.

Il numero totale di passeggeri per ogni paese è ottenuto contando ogni singolo passeggero su uno specifico volo (numero di volo) registrato nel paese, ma il conteggio

viene effettuato una sola volta e non per ogni singola tappa effettuata da quel volo specifico a meno che il passeggero non voli sia su una tratta nazionale che internazionale, in quel caso viene conteggiato sia come passeggero nazionale che internazionale.

I dati coprono il traffico aereo dei servizi di linea, ma i cambiamenti nei regolamenti del trasporto aereo in Europa hanno reso più difficile classificare il traffico come di linea o non di linea. Pertanto, il forte aumento riscontrato in alcuni paesi europei potrebbe essere dovuto a cambiamenti nella classificazione del traffico aereo piuttosto che alla crescita effettiva.

Come si nota nei grafici, in 25 anni il traffico passeggeri di molti paesi europei è quasi triplicato. (Figura 7,8,9,10)



Figura 7-Traffico passeggeri Regno Unito

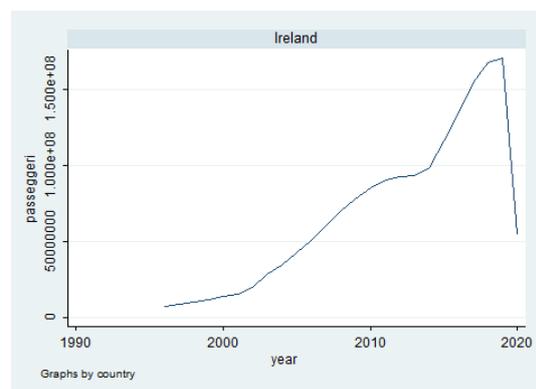


Figura 8-Traffico passeggeri Irlanda



Figura 9-Traffico passeggeri Finlandia

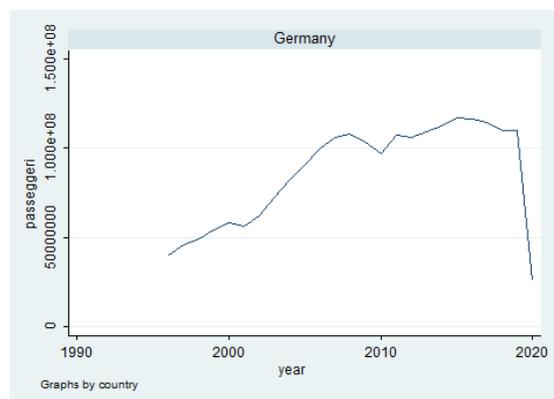


Figura 10-Traffico passeggeri Germania

In generale, l'andamento della variabile Passeggeri è crescente negli anni in tutti i paesi come mostrato in *Figura 11*. In media la crescita si aggira intorno al 4% l'anno come esposto in precedenza. La Cina e gli USA sono stati fittati separatamente in *Figura 12* e in *Figura 13* perché a causa della loro demografia hanno valori molto più elevati rispetto agli altri paesi.

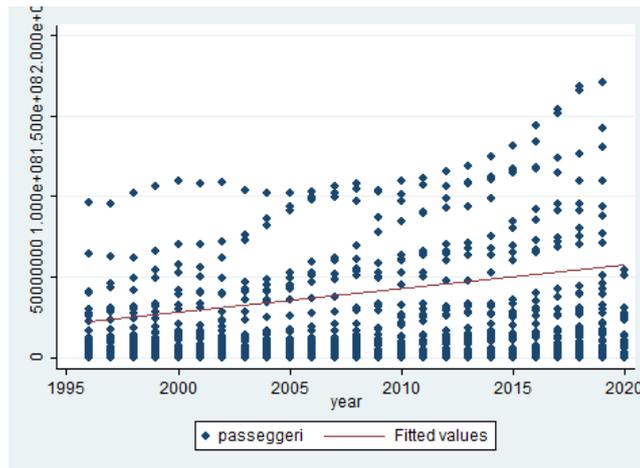


Figura 11-Andamento Passeggeri esclusa Cina e USA

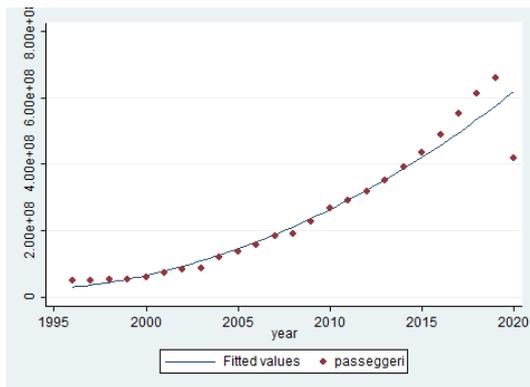


Figura 12-Andamento passeggeri USA

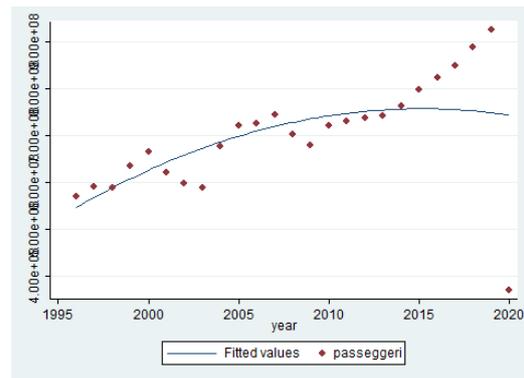


Figura 13-Andamento passeggeri Cina

La variabile GDP (gdpUS2015) è la somma del valore aggiunto lordo di tutti i produttori residenti nell'economia più le tasse sui prodotti a meno dei sussidi non inclusi nel valore dei prodotti. È calcolato senza fare deduzioni per il deprezzamento dei beni fabbricati o

per l'esaurimento e il degrado delle risorse naturali. I dati sono stati reperiti dalla World Bank che aggrega i dati di contabilità della Banca Mondiale con i dati di contabilità Nazionale dell'OCSE (Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico). I dati sono espressi in dollari al valore costante del 2015 (kUS₂₀₁₅). Per alcuni paesi in cui il tasso di cambio ufficiale non riflette il tasso effettivamente applicato alle effettive transazioni in valuta estera, viene utilizzato un fattore di conversione alternativo. Il 2015 è stato scelto come anno di riferimento perché è un anno di ristabilizzazione dei prezzi dopo il periodo di recessione degli anni precedenti (2009-2014). Anche se non offre una visione completa delle condizioni di ricchezza di un paese il GDP è sicuramente un buon indicatore di sintesi dell'economia di un paese.

Dai dati si può osservare che anche l'andamento della variabile GDP è crescente negli anni (Figura 14) anche in questo caso per facilità di visualizzazione la Cina e gli USA sono mostrati separatamente (Figura 15,16)

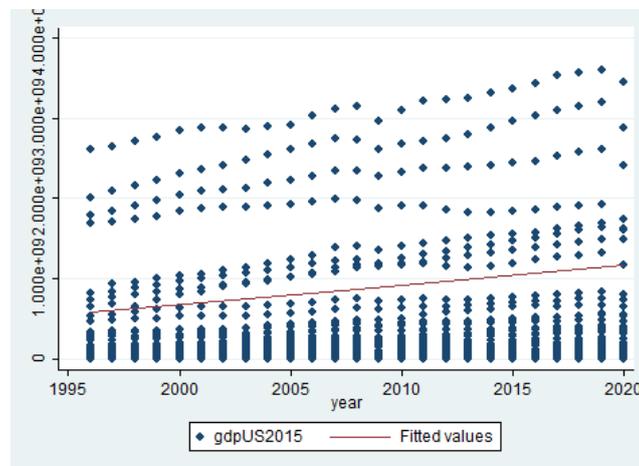


Figura 14 Andamento GDP esclusi China e USA

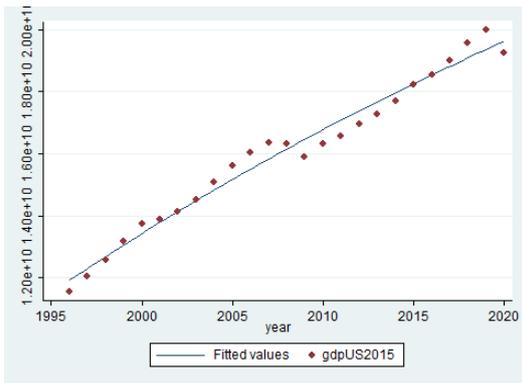


Figura 15-Andamento GDP USA

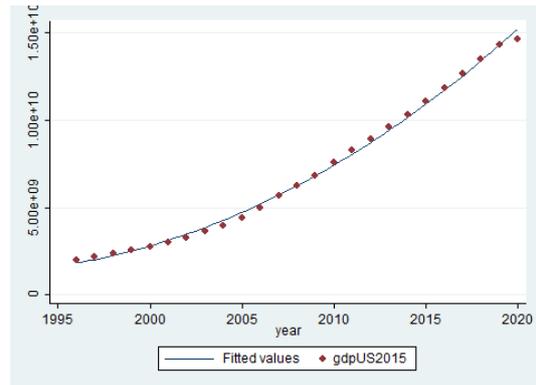


Figura 16-Andamento GDP China

Per le previsioni relative al GDP sono stati prelevati i dati dal Database dell'International Monetary Found. Esse sono disponibili per un arco temporale che si estende fino al 2026.

L'ultima variabile presa in considerazione nel modello è il prezzo del petrolio, nello specifico si tratta del Brent Crude oil, i dati provengono dall'Energy Information Administration (EIA) che è la principale agenzia del Sistema Statistico Federale Statunitense e si occupa della raccolta, dell'analisi e della diffusione di dati e informazioni sull'energia.

Il prezzo medio del Brent è espresso in US Dollars al barile (US/bbl), dove un barile corrisponde a 158,987 litri. La scelta del Brent è dovuta al fatto che il suo prezzo agisce come prezzo di riferimento in gran parte del mondo. Infatti, è il prezzo di riferimento per i paesi Europei e per il 60% della restante parte del mondo. Un altro prezzo a cui si potrebbe far riferimento è quello del West Texas Intermediate (WTI). Le due tipologie di petrolio non assumono mai la stessa quotazione, ma il loro andamento è assimilabile. Il prezzo del petrolio viene utilizzato come proxy del Jet Fuel, infatti, il prezzo del carburante per Jet è molto volatile così come il prezzo del petrolio ed è influenzato da diversi aspetti, ma essendo un derivato del petrolio (cherosene) il prezzo di quest'ultimo

è ciò che lo influenza maggiormente. Come si può notare in *Figura 17* l'andamento del Jet Fuel e quello del Brent sono facilmente assimilabili.

Andamento dei prezzi del carburante per jet - prospettiva a più lungo termine



Figura 17-Andamento dei prezzi del Jet Fuel e del Brent - FONTE: IATA Jet Fuel price monitor

6.2 Modelli econometrici

I modelli econometrici testati nell'analisi sono due.

Il primo modello ha l'obiettivo di comprendere quale è la relazione che lega l'andamento economico di un paese e il prezzo del petrolio con il numero di persone che volano.

$$\text{Passeggeri}_{it} = \beta_1 \text{gdpUS2015}_{it} + \beta_2 \text{prezzo}_{it} + \alpha_i + u_{it}$$

Il modello è stato espresso sia nella forma lineare che in quella log-log, l'ultimo caso ci consente di valutare le relazioni in termini percentuali, ovvero una variazione percentuale dell'1% in X_i determina una variazione pari di Y pari a $\beta_i\%$

Inoltre, il modello è stato specificato per i paesi europei che sono un sottoinsieme più omogeneo del Dataset complessivo sia da un punto di vista economico che culturale.

Nel secondo modello si mette in discussione il nesso di causalità-effetto ipotizzato nel modello precedente tra prezzo e traffico passeggeri e si inverte il loro posizionamento. In questo caso si cerca di capire se il prezzo del petrolio è influenzato in maniera rilevante dalla domanda (il settore aereo detiene il 10% della domanda complessiva di petrolio)

$$\text{Prezzo}_{it} = \beta_1 \text{gdpUS2015}_{it} + \beta_2 \text{Passeggeri}_{it} + \alpha_i + u_{it}$$

Questo modello è stato espresso solo nella forma funzionale log-log e in seguito specificata per i paesi non appartenenti o appartenenti all'OPEC⁶, per comprendere l'influenza che questi ultimi hanno nella determinazione del prezzo.

6.3 Analisi empirica

Prima di effettuare l'analisi econometrica, è stata effettuata un'analisi statistica dei dati. In prima istanza è stata analizzata la relazione tra il traffico passeggeri e il GDP plottando i dati sugli assi cartesiani e fittandoli linearmente.

Nel primo grafico sono stati fittati i dati relativi ai 51 i paesi del dataset e l'andamento lineare crescente sembra descrivere bene la relazione tra le variabili (*Figura 17*), si nota però una forte concentrazione dei dati entro le prime 5 migliaia di Miliardi di \$ di GDP. Oltre quel valore di GDP si collocano soltanto due stati, la Cina e gli Stati Uniti, che hanno valori totalmente differenti rispetto alle altre nazioni. Per questa ragione il grafico è riproposto scartando i due stati "outlier", in questo caso l'andamento lineare è meno evidente, ma è comunque possibile ipotizzare una relazione crescente che lega il GDP con il traffico passeggeri (*Figura 19*).

⁶ OPEC: The Organization of the Petroleum Exporting Countries fu fondata a Baghdad nel settembre del 1960 ed attualmente conta 12 Paesi membri. L'organizzazione nasce per negoziare con le compagnie petrolifere aspetti relative alla produzione di petrolio, i prezzi e le concessioni. I membri OPEC controllano circa l'80% delle riserve mondiali di petrolio.

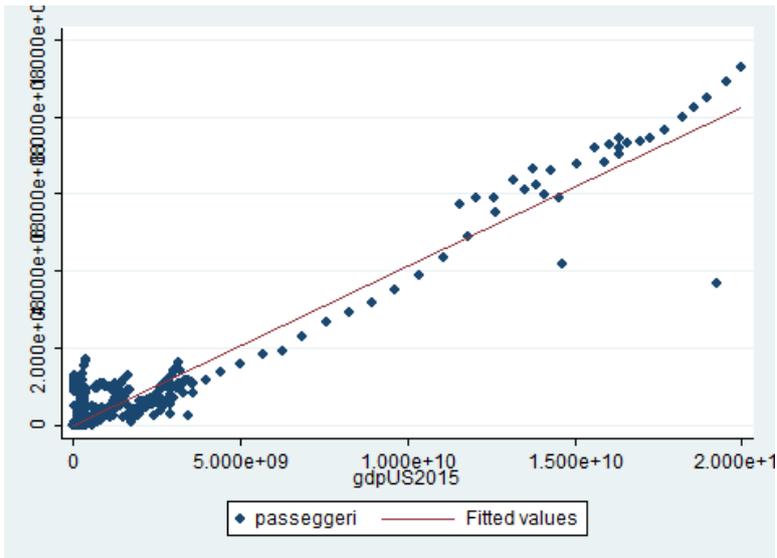


Figura 18-Fitting dei dati dei 51 paesi High-Income (Passeggeri-GDP)

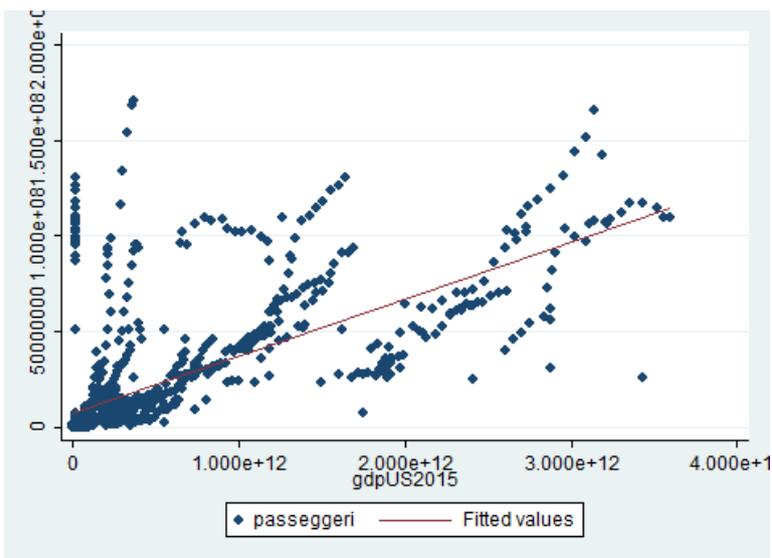


Figura 19-Fitting dei dati dei 51 paesi High-Income esclusi China e United States (Passeggeri-GDP)

L'andamento viene confermato anche plottando i dati sull'aggregato Mondo, la relazione non sembra essere lineare, piuttosto quadratica, ma conferma la reazione positiva (Figura 20).

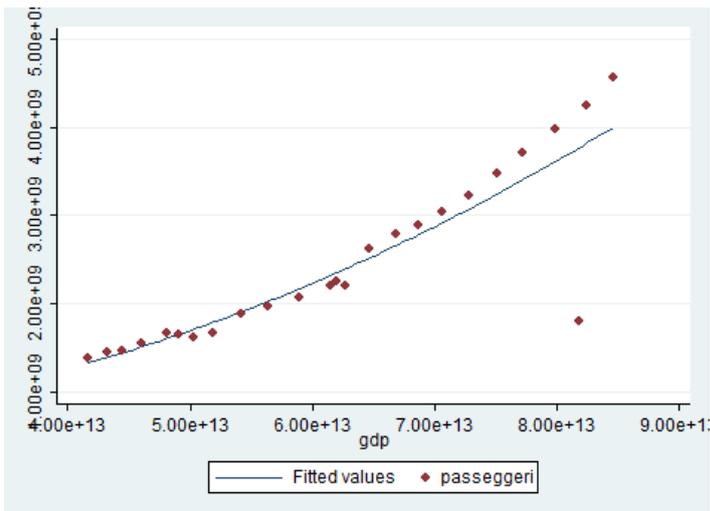


Figura 20-Grafico passeggeri-GDP sull'aggregato mondo dal 1996 al 2020

Per quanto riguarda la relazione che lega il Prezzo con il traffico passeggeri, va ricordato che nell'analisi viene utilizzato il Prezzo del petrolio di riferimento dei mercati internazionali come proxy del prezzo del Jet Fuel. In generale, le principali spese che colpiscono le aziende del settore aereo sono i costi del lavoro e del carburante. I costi del lavoro sono in generale costanti nel breve termine, mentre i costi del carburante possono oscillare in base al prezzo del petrolio anche molto velocemente.

I costi del carburante possono arrivare a rappresentare anche il 45% dei costi operativi di una compagnia aerea, negli anni la percentuale è cresciuta a causa dell'aumento del costo del Jet Fuel che deriva da un aumento del prezzo del petrolio. Il petrolio e di conseguenza il Jet Fuel come suo derivato sono combustibili che appartengono alla categoria dei prodotti energetici ed hanno un prezzo molto volatile e fortemente influenzato dalla domanda e dall'offerta di mercato, dal comportamento dei compratori, da eventi economici, dai cartelli dell'OPEC, e dalla politica degli stati. Per questa regione quando si parla di petrolio si considerano i mercati spot. In questi mercati il prezzo viene fissato ogni giorno e fa da benchmark per i prezzi del mondo, questo rende il petrolio un bene disponibile in tutte le parti del mondo in egual modo. A meno che si effettuino

dei contratti futures⁷ per bloccare i costi del carburante per un determinato periodo di tempo, i costi delle compagnie aeree sono molto influenzate dall'oscillazione del prezzo del petrolio, pertanto è ipotizzabile che i prezzi dei biglietti tendano ad aumentare e diminuire in maniera concorde con il prezzo del petrolio e che di conseguenza anche il traffico passeggeri assuma lo stesso andamento.

7 RISULTATI

Prima di effettuare l'analisi di regressione per comprendere la relazione che lega le variabili prese in esame è stata osservata la matrice delle correlazioni (*Figura 21*). Dalla matrice si può notare una forte correlazione positiva tra il traffico passeggeri e il GDP pari a 0.9615, questo indica che se i valori sono legati da una relazione lineare tendono a variare nello stesso senso. La correlazione tra queste due variabili è molto forte e significativa a differenza delle altre variabili del modello che invece sono correlate debolmente tra loro. Anche se debole e poco significativa, la correlazione tra la variabile passeggeri e il GDP e quella tra il Prezzo e i passeggeri è positiva.

⁷ Un contratto future rappresenta un accordo legale tra due parti per la negoziazione di un asset ad un prezzo predefinito, in una data futura specifica. I contratti future sono negoziati su un mercato regolamentato e possono essere utilizzati per ottenere un'esposizione su diversi asset, come materie prime o indici.

	gdpUS2015	passengeri	Prezzo
gdpUS2015	1.000		
passengeri	0.9615	1.0000	
Prezzo	0.0380	0.0687	1.0000
	0.1777	0.0176	

Figura 21-Matrice delle correlazioni tra le variabili GDP, passeggeri, prezzo con le relative significatività

Le analisi di regressione sono state effettuate prima in forma lineare e poi in forma log-log, infatti, i dati utilizzati nelle analisi di regressione sono continui ed è quindi possibile effettuare le trasformazioni polinomiali logaritmiche. I risultati riportati di seguito sono in forma log-log perché consentono una comprensione più immediata del legame tra le variabili. Il coefficiente, infatti, rappresenta l'elasticità della variabile dipendente rispetto a quella indipendente.

Per comprendere l'influenza che le variabili GDP e Prezzo hanno sul traffico passeggeri è stata effettuata l'analisi di regressione prima sull'intero campione di 51 Paesi selezionati e poi su due sottogruppi: Paesi europei e Paesi non europei. Il numero totale di osservazioni è di 1188, mentre per i due sottogruppi abbiamo 725 osservazioni per i paesi europei e 463 per quelli non europei.

Dalla tabella dei risultati è chiaramente confermata la forte relazione positiva tra l'andamento del GDP di un paese e il suo traffico passeggeri (Figura 22). Prendendo in considerazione la regressione con un'unica variabile indipendente GDP, un aumento percentuale dell'1% della variabile indipendente provoca un aumento dell'1.1995% della variabile dipendente passeggeri, la relazione tra queste due variabili risulta significativa anche con l'introduzione della variabile Prezzo all'interno della regressione. Nella regressione multipla la percentuale di aumento del traffico passeggeri risulta

leggermente inferiore rispetto al caso precedente, in questo caso un aumento dell'1% del GDP fa aumentare il traffico passeggeri dello 0.861%.

Entrambe le variabili indipendenti del modello risultano significativamente diverse da zero con un livello di significatività dello 0.05%. Per quanto riguarda la variabile prezzo all'aumentare dell'1% del prezzo del Petrolio (utilizzato come proxy del prezzo del carburante per Jet) il numero di passeggeri aumenta dello 0.206%. La relazione che si evidenzia nelle regressioni tra il GDP e il traffico passeggeri conferma quanto ipotizzato dall'osservazione empirica dei dati (*paragrafo 6.3*).

Invece, la relazione tra il prezzo del petrolio e il traffico passeggeri sembra in netto contrasto con l'ipotesi empirica di una relazione negativa tra le due variabili (*paragrafo 6.3*). Infatti, ci si sarebbe aspettati che l'aumento del prezzo del petrolio comportasse un aumento del prezzo dei biglietti aerei e di conseguenza una riduzione del traffico passeggeri, non confermato dal modello di regressione.

È evidente che nel modello ipotizzato ci sia una forte distorsione da variabile omessa, perché il traffico passeggeri è chiaramente influenzato da molti altri aspetti di carattere culturale, geografico e politico che per semplicità non verranno presi in considerazione in questa analisi.

Regressione log-log (Fixed effect Paesi)	1	1
	log(passeggeri)	log(passeggeri)
lgdpUS2015	1.1995*** (0.1846)	0.8607*** (0.2259)
lprezzo		0.2046*** (0.048)
constant	-6.7446 (3.458)	-1.1819 (4.132)
R-sqr	0.2	0.223
F	42	37
chi2		
obs	1188	1188
Fixed_Effects	YES	YES
Effetti_temporali	NO	NO
* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$		

Figura 22-Passeggeri e GDP dei paesi High-Income e prezzo del petrolio

Dopo aver effettuato le regressioni sul campione completo dei 51 Paesi selezionati dalla lista HIGH-INCOME è stata effettuata l'analisi su due sottoinsiemi specifici. I paesi appartenenti all'Europa e quelli al di fuori del territorio europeo. L'analisi per il territorio europeo è stata effettuata per comprendere se le relazioni sopra evidenziate si verificano anche su un gruppo di paesi più omogeneo dal punto di vista economico e politico. Nel caso del territorio europeo la relazione tra l'andamento del GDP e il traffico passeggeri è positivo, ma statisticamente meno significativo (Figura 23). Questo potrebbe essere legato a diversi fattori, come il fatto che molti paesi hanno un traffico passeggeri per lo più legato al turismo straniero e non interno. Infatti se si prende in considerazione la Grecia, il suo traffico passeggeri è legato principalmente a viaggiatori esteri e non interni. Quindi è probabile che l'andamento dei passeggeri registrato in questo caso è piuttosto collegata all'andamento del GDP di altri paesi che al proprio.

Regressione log-log (Fixed effect Paesi)	3	4
	log(passeggeri EU)	log(passeggeriEU)
lgdpUS2015	1.2518** (0.3866)	0.5259 (0.5498)
lprezzo		0.3228** (0.0902)
constant	-8.203 (7.319)	4.3039 (10.1185)
R-sqr	0.113	0.153
F	10	34
chi2		
obs	725	725
Fixed_Effects	YES	YES
Effetti_temporali	NO	NO
* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$		

Figura 23-Passeggeri e GDP dei paesi europei e prezzo del petrolio

Nel caso dei paesi NON-UE (*Figura 24*) la variabile GDP risulta sempre molto significativa con un aumento dell' 1.08% di passeggeri all'aumentare dell'1% del GDP, mentre il prezzo del petrolio ha una relazione sempre positiva, ma il coefficiente in questo caso non è significativamente diverso da zero. Per testare la robustezza del modello, le regressioni sono state effettuate anche con effetti causali ed i risultati sono mostrati in *Appendice (TabellaA2)*.

Regressione log-log (Fixed effect Paesi)	5	6
	log(passeggeri NON-EU)	log(passeggeri NON-EU)
lgdpUS2015	1.1662*** (0.1829)	1.0880*** (0.1793)
lprezzo		0.0611 (0.0602)
constant	-5.3983 (3.3718)	-4.1937 (3.282)
R-sqr	0.468	0.471
F	41	20
chi2		
obs	463	463
Fixed_Effects	YES	YES
Effetti_temporali	NO	NO
* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$		

Figura 24-Passeggeri e GDP dei paesi non Europei e prezzo del petrolio

Risulta particolarmente insolita la relazione che lega il prezzo del petrolio con il traffico passeggeri e per questa ragione è stata effettuata un'analisi di regressione con le stesse variabili viste sino ad ora, ma invertendo il nesso di causalità tra le due. Il prezzo è stato preso come variabile dipendente (Figura 25).

In questo caso si nota che è molto significativa la relazione che lega il GDP con il prezzo del petrolio, infatti, all'aumentare dell'1% del GDP il prezzo del petrolio aumenta di circa 1.49 punti percentuali. Inoltre, anche la relazione tra il traffico passeggeri e il prezzo del petrolio risulta significativa e diversa da zero con un livello di significatività dello 0.05%. In questo caso, all'aumentare dell'1% del traffico passeggeri il prezzo del petrolio aumenta dello 0.139%, da questa relazione sembrerebbe che il prezzo del petrolio tende a seguire sia l'andamento economico dei paesi (GDP) che il traffico passeggeri. Infatti, il prezzo del petrolio è molto influenzato alla domanda e dall'offerta di mercato e il settore del trasporto aereo detiene circa il 10% della domanda totale di petrolio.

La stessa analisi di regressione è stata effettuata sui paesi appartenenti all'OPEC⁸ e su quelli esterni all'Organizzazione. Nel caso dei paesi NON-OPEC le relazioni viste in precedenza vengono confermate e le variabili risultano altamente significative. Ma si nota che effettuando la regressione sui soli paesi OPEC la relazione tra le variabili non risulta statisticamente significativa.

Potrebbe essere che l'aumento della domanda di petrolio da parte degli stati importatori sia strettamente collegato all'andamento dei prezzi del petrolio poiché i membri dell'OPEC controllano il 75% dell'offerta totale del bene e quindi hanno forte potere sulla definizione del prezzo.

Nell'analisi i prezzi del petrolio sono quelli di riferimento (Brent) che si modificano negli anni ma non tra paesi.

Reg log-log fixed effect	log(prezzo)	log(prezzo NO OPEC)	log(prezzo OPEC)
lgdpUS2015	1.489*** (0.212)	1.576*** (0.223)	1.007 (0.612)
lpasseggeri	0.139*** (0.029)	0.140*** -0.028	0.212 (0.224)
constant	-26.247*** (3.914)	-27.454*** -4.046	-20.431 (10.946)
R-sqr	0.429	0.439	0.396
F	44	47	4
chi2			
obs	1188	1032	156
Fixed_Effects	YES	YES	YES

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

Figura 25-Prezzo del petrolio, GDP e passeggeri per i paesi High-income, paesi OPEC e NON OPEC

⁸ L'Organizzazione dei Paesi esportatori di petrolio (OPEC - Organization of the Petroleum Exporting Countries) è stata fondata nel 1960 da Iran, Iraq, Kuwait, Arabia Saudita e Venezuela. Attualmente comprende dodici Paesi, i quali si sono accordati per limitare la concorrenza con le compagnie petrolifere su aspetti relativi alla produzione di petrolio, prezzi e concessioni.

8 CONCLUSIONI

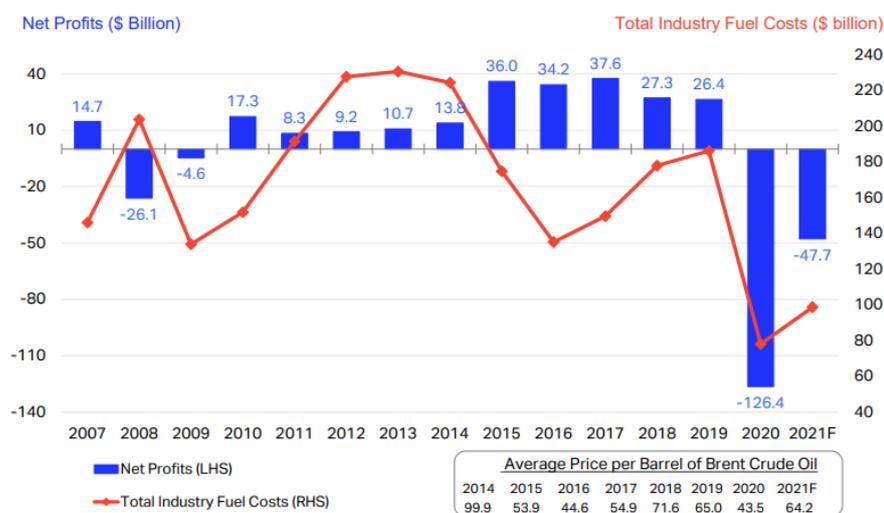
Il settore del trasporto aereo contribuisce al 2% delle emissioni globali e al 12% delle emissioni dell'intero settore dei trasporti. Le emissioni di CO₂ per passeggero sono di circa 285g , questo valore è il più alto tra tutti i mezzi di trasporto. Il settore è senza dubbio molto importante per l'economia mondiale moderna, ma questo non rende meno rilevante il suo impatto sull'ambientale. Sembrerebbe che allo stato attuale, l'unica strada per la decarbonizzazione del settore sia quella dei carburanti liquidi sostenibili. Se consideriamo i prezzi attuali dei biocarburanti è evidente che sono ancora molto elevati se paragonati a quelli del Jet Fuel tradizionale. Infatti, dall'analisi della letteratura è emerso un range di prezzo per i biocarburanti più vicini alla commercializzazione che va dai 630 \$/tonnellata ai 4000\$/tonnellata. La differenza di prezzo tra i vari percorsi di conversione dipende principalmente dalla struttura di costo dei percorsi e dalle materie prime utilizzate. Attualmente i percorsi che possiedono costi più bassi e sono vicini alla commercializzazione su larga scala sono l'HEFA e l'ATJ. Ma il prezzo medio del Jet Fuel tradizionale è di circa 530\$/tonnellata (IATA 2021) ed è un prezzo chiaramente inferiore al minimo stimato per i biocarburanti. Per questa ragione è molto improbabile che le compagnie propendano spontaneamente verso l'utilizzo dei biocarburanti e che le raffinerie facciano investimenti significativi senza una spinta politica.

Attualmente la politica si sta muovendo a sostegno dell'utilizzo delle miscele sostenibili, infatti, troviamo il piano "Fit for 55" nell'ambito del Green Deal europeo e il CORSIA dell'ICAO nell'ambito dell'aviazione internazionale. Queste iniziative giocheranno un ruolo fondamentale nella determinazione dei prezzi. Infatti, secondo la Commissione Europea, il percorso HEFA grazie al ReFuelAviation raggiungerà il punto di pareggio entro il 2030, ma la carenza di materie prime per il percorso non consentirà di soddisfare tutta la domanda di Biojet Fuel e pertanto sarà necessario che anche gli altri percorsi si avvicinino alla commercializzazione. La diminuzione dei prezzi dei vari percorsi dipende principalmente dalla struttura dei costi, dalle economie di scala e dalla disponibilità della materia prima. È essenziale che il quadro normativo Europeo e internazionale forniscano un insieme di regole chiare e definite sul lungo periodo per consentire un aumento degli

investimenti in bioraffinerie, questi investimenti richiedono grosse somme in conto capitale. L'introduzione di una quota obbligatoria di SAF, come previsto nel piano "Fit for 55" e nel CORSIA, stimolerà gli investimenti nella tecnologia aumentando le economie di scala e gli effetti di apprendimento. Diminuiranno così i costi di produzione dei SAF, anche se non così tanto da renderli competitivi. Si avrà un inevitabile aumento del costo del Fuel disponibile sul mercato, ma la presenza delle sole miscele sostenibili farà in modo che l'aumento del prezzo non sarà una discriminante d'acquisto. Attualmente la capacità produttiva non risulta un fattore limitante, ma potrebbe essere necessario aumentare gli investimenti per soddisfare gli obiettivi fissati per il 2050. È chiaro che la politica gioca un ruolo fondamentale e che le differenti iniziative necessitano di essere armonizzate per rendere più chiaro l'effetto positivo congiunto.

L'aumento del prezzo delle miscele per Jet avrà però inevitabilmente un impatto diretto e rilevante sulle compagnie aeree, infatti i costi per il carburante rappresentano per una compagnia aerea dal 15 al 45% dei costi operativi totali. Negli ultimi anni le oscillazioni del prezzo del Brent hanno mostrato che ad un suo aumento corrisponde una riduzione dei profitti netti (Figura 26), fatto eccezione il 2020 che ha subito una paralisi dovuta al Covid-19 e non ai prezzi del Brent.

Industry Fuel Costs and Net Profit



Source: IATA
 Updated: 04/2021 Next Update: 06/2021

Figura 26-Costi del Jet Fuel e Profitti Netti delle compagnie aeree.

Proprio per evitare perdite rilevanti, secondo la Commissione Europea, le compagnie aeree riverseranno totalmente gli aumenti di prezzo sui consumatori finali (passeggeri) con un aumento del costo dei biglietti dallo 0.8% all' 8.2%. Questo potrebbe far ridurre il traffico passeggeri e causare forti disagi per il settore, ma le analisi econometriche ci suggeriscono che il traffico passeggeri è significativamente influenzato dal GDP del suo Paese, infatti, all'aumentare del GDP aumenta di un valore simile anche il numero dei passeggeri (l'aumento va inteso in termini percentuali). Gli studi che analizzano il trend del GDP evidenziano che, nonostante le contrazioni dovute al Covid-19 nel 2020, l'aumento medio annuale del GDP sarà di circa il +4% fino al 2026 (IMF, 2021). Per la relazione vista in precedenza è possibile stimare un aumento del traffico passeggeri di un +4% annuo legato all'andamento stimato del GDP, questo valore è confermato anche dalla letteratura. Al contempo, un aumento del prezzo del petrolio (utilizzato come proxy del prezzo del carburante per Jet) non sembra comportare una contrazione dei passeggeri, infatti nelle analisi di regressione la relazione tra il Prezzo del carburante e il traffico passeggeri risulta essere lievemente positiva o statisticamente non significativa. Sarebbe indubbiamente necessario analizzare tutti gli altri aspetti che influenzano il traffico passeggeri per avere un quadro più chiaro e completo. Si può però concludere che l'introduzione dei Biofuels con quote obbligatorie, anche se con un prezzo non ancora competitivo con il Jet Fuel tradizionale, potrebbe non comportare una destabilizzazione del mercato dal punto di vista della domanda.

APPENDICE

Tabella A1. Regressione lineare con effetti fissi, Passeggeri , GDP e Prezzo del petrolio

Regressione lineare (Fixed effect Paesi)	A1	A2	A3	A4	A5	A6
	passeggeri	passeggeri	passeggeriEU	passeggeriEU	passeggeri NON-EU	passeggeri NON-EU
gdpUS2015	0.0409*** (0.0039)	0.0403*** (0.0041)	0.0753*** (0.012)	0.0698*** (0.0109)	0.0405*** (0.0041)	0.0400*** (0.0044)
Prezzo		80356.5619** (29000.084)		52105.5951 (28222.1251)		72719.503 (45954.1247)
constant	2888734.531 (3552448.229)	-1022639.95 (3384805.252)	-2.1314e+07** (6434226.4552)	- 2.1236e+07** (6395441.8504)	12646875.02 (6238933.7827)	9225811.122 (5511180.4891)
R-sqr	0.684	0.689	0.322	0.334	0.729	0.731
F	112	79	39	21	96	79
chi2						
obs	1194	1194	726	726	468	468
Fixed_Effects	YES	YES	YES	YES	YES	YES
Effetti temporali	NO	NO	NO	NO	NO	NO
* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$						

TabellaA2. Regressione lineare e log-log, Passeggeri, GDP e prezzo del petrolio.

Regressione(Random effect)	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
	passeggeri	log(passeggeri)	passeggeri	log(passeggeri)	passeggeriEU	log(passeggeriEU)	passeggeriEU	log(passeggeriEU)	passeggeri NON-EU	log(passeggeri NON-EU)	passeggeri NON-EU	log(passeggeri NON-EU)
gdpUS2015	0.0410*** (0.0023)		0.0406*** (0.0024)		0.0440*** (0.0061)		0.0413*** (0.0058)		0.0408*** (0.0022)		0.0405*** (0.0023)	
lgdpUS2015		0.9687*** (0.1146)		0.7881*** (0.0942)		1.0474*** (0.1483)		0.8200*** (0.1244)		1.0261*** (0.1515)		0.9307*** (0.1309)
Prezzo			79435.1301*				85222.8494*				68979.7899	
			(26994.4967)				(34694.3908)				(38820.2159)	
lprezzo												0.1096 (0.0623)
				0.2231*** (0.0397)								
constant	2785471.636 (4507230.65)	-2.4158 (2.1739)	-1171752.4 (4252809.08)	0.1042 (1.7833)	-433292.669 (2641135.4326)	-4.3292 (2.7722)	7486128.4191 (284074.290)	-1.0026 (2.3567)	11625793.01 (8220640.548)	-2.8048 (2.9015)	8193573.744 (8557438.1036)	-1.4896 (2.533)
R-sqr												
F												
chi2	329.1	71.4	355	86.3	52.2	49.8	53	53.1	340.5	45.9	362	51.4
obs	1194	1188	1194	1188	726	725	726	725	468	463	468	463
Fixed_Effects	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Effetti temporali	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO

* p < 0.05, ** p < 0.01, *** p < 0.001

TabellaA3. Elenco dei paesi utilizzati nelle analisi. Lista di riferimento High-Income della World Bank

Antigua and Barbuda	Greece	Norway
Australia	China	Oman
Austria	Hungary	Poland
Bahamas, The	Iceland	Portugal
Bahrain	Ireland	Qatar
Belgium	Israel	Saudi Arabia
Brunei Darussalam	Italy	Seychelles
Canada	Japan	Singapore
Chile	Korea, Rep.	Slovak Republic
Croatia	Kuwait	Slovenia
Cyprus	Latvia	Spain
Czech Republic	Lithuania	Sweden
Denmark	Luxembourg	Switzerland
Estonia	Malta	United Arab Emirates
Finland	Nauru	United Kingdom
France	Netherlands	United States
Germany	New Zealand	Uruguay

TabellaA4 .Sott'insieme dei paesi sopra elencati e appartenenti all' OPEC, OPEC+.

Kuwait
Saudi Arabia
Qatar
United Arabs Emirates
Canada
United Kingdom
Norway
United States
Oman

TabellaA5. Riepilogo maggiori articoli sulla sostenibilità economica delle politiche a favore dei biofuels.

Articolo	Autori	Data	Metodologia	Risultati
Carbon tax or sustainable aviation fuel quota	Changmin Jiang, Hangjun Yang	nov-21	Confronto tra la politica della tassa sul carbonio e la politica delle quote SAF mediante la costruzione di un modello economico per l'ottimizzazione delle quote di CO2 e del benessere sociale	Se il prezzo dei SAF non è competitivo può essere inefficiente spingere sulle quote SAF, ma questa strada risulta efficace quando gli obiettivi di riduzione sono ambiziosi. Prezzo cruciale
Sustainable Aviation Fuels: the challenge of decarbonization	David Chiamonti	feb-19	Analisi della tendenza della domanda del carburante per l'aviazione e possibili strade per la produzione del carburante per jet	Lo sviluppo commerciale dei biofuels sarà possibile solo con un adeguato incentivo politico europeo e internazionale a causa dei grossi investimenti richiesti per lo sviluppo della tecnologia (es. impianti)
The effect of the European Emissions Trading System (EU ETS) on aviation demand: An empirical comparison with the impact of ticket taxes	Katrin Oesingmann	gen-22	Analisi di regressione per studiare l'effetto sulla domanda (passeggeri) dell'ETS (UE) e della tassa sul carbonio	L'ETS non ha effetto significativo sul traffico passeggeri mentre la tassa sul carbonio ha effetto negativo.
Carbon offsetting and reduction scheme with sustainable aviation fuel options: Fleet-level carbon emissions impacts for U.S. airlines	Hsun Chao, Datu Buyung Agusdinata, Daniel DeLaurentis, Ellen B.Stechel	ott-19	Confronto tra le traiettorie di emissione dello scenario business-as-usual (nessuna politica) e dello scenario con l'introduzione della politica CORSIA in USA	Probabilità del 3,5% che la politica CORSIA possa ridurre le emissioni del 37,5-50% nel 2050, ma i costi del carburante e del carbonio giocano un ruolo fondamentale.

<p>The challenge of forecasting the role of biofuel in EU transport decarbonisation at 2050: A meta-analysis review of published scenarios</p>	<p>David Chiaramonti, Giacomo Talluri, Nicolae Scarlat, Matteo Prussi</p>	<p>apr-21</p>	<p>meta-analisi qualitativa e quantitativa degli scenari di previsione del consumo di biocarburanti presenti in letteratura per il periodo 2030-2050</p>	<p>Aumento marcato dei biocarburanti nell'aviazione entro il 2050 con 16,7 MTOE</p>
<p>REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on ensuring a level playing field for sustainable air transport</p>	<p>Commissione Europea</p>	<p>lug-21</p>	<p>Analisi di diverse opzioni per l'introduzione dei SAF con una percentuale obbligatoria</p>	<p>Diminuzione dei costi dei percorsi di conversione grazie alle economie di scala, aumento dei costi per le compagnie aeree e del prezzo dei biglietti aerei</p>

SITOGRAFIA

www.camera.it/temiap/documentazione/temi/pdf/1104844.pdf

www.carbonsink.it/it/news/obiettivo-carbon-neutrality

www.esg360.it/normative-e-compliance/accordo-sul-clima-di-parigi-che-cose-cosa-chiede-come-sta-evolvendo/

www.rinnovabili.it/ambiente/politiche-ambientali/pacchetto-fit-for-55-ue/

www.fedespedi.it/verso-il-fit-for-55-package-refueleu-aviation-e-fueleu-maritime-gli-strumenti-per-incentivare-lutilizzo-di-carburanti-sostenibili-nel-settore-aereo-e-marittimo/

www.carbonbrief.org/qa-how-fit-for-55-reforms-will-help-eu-meet-its-climate-goals

www.economia-italia.com/aereo-auto-qual-e-mezzo-di-trasporto-inquina-di-piu-qual-e-il-pi%C3%B9-sostenibile

www.isprambiente.gov.it/it/servizi/registro-italiano-emission-trading/le-novita-del-registro/corsia

www.fedespedi.it/verso-il-fit-for-55-package-refueleu-aviation-e-fueleu-maritime-gli-strumenti-per-incentivare-lutilizzo-di-carburanti-sostenibili-nel-settore-aereo-e-marittimo/

www.carbonbrief.org/qa-how-fit-for-55-reforms-will-help-eu-meet-its-climate-goals

www.greencarcongress.com/

www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2021.760713/full#T1

<https://ptx-hub.org/how-is-saf-produced-conversion-processes-explained/>

<https://www.iata.org/en/publications/economics/fuel-monitor/>

<https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/SAF.aspx>

<https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/Airports.aspx>

www.statista.com/statistics/262860/uk-brent-crude-oil-price-changes-since-1976/

BIBLIOGRAFIA

Brown, A. W. (2020). Advanced Biofuels – Potential for Cost Reduction. *IEA Bioenergy: Task 41*.

Changmin Jiang, H. Y. (2021). Carbon tax or sustainable aviation fuel quota. *Energy Economics*, Volume 103, 105570.

- Chiaramonti, D. (2019). Sustainable Aviation Fuels: the challenge of decarbonization. *Energy Procedia*, Volume 158, Pages 1202-1207.
- Chiaramonti, D. T. (2021). The challenge of forecasting the role of biofuel in EU transport decarbonisation at 2050: A meta-analysis review of published scenarios. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 139, 110715.
- Christian Hofera, M. E. (2010). The environmental effects of airline carbon emissions taxation in the US. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 15, Pages 37-45.
- Commissione Europea. (2019). Comunicazione della commissione europea- Il Green Deal europeo. *COM(2019) 640 final*. Bruxelles: Commissione Europea. Tratto da https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0006.02/DOC_1&format=PDF
- Commissione Europea. (2021). "Pronti per il 55 %": realizzare l'obiettivo climatico dell'UE per il 2030 lungo il cammino verso la neutralità climatica. In C. europea (A cura di), *COM(2021) 550 final*. Bruxelles: commissione Europea. Tratto da <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52021DC0550&from=IT>
- Commissione Europea. (2021). REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on ensuring a level playing field for sustainable air transport. Brussels, 14.7.2021 COM(2021) 561 final.
- De Jong, S. A. (2017). Life-cycle analysis of greenhouse gas emissions from renewable jet fuel production. *Biotechnology for Biofuels*, 10(1), 1–18.
- de Jong, S. H. (2017). Cost optimization of biofuel production – The impact of scale, integration, transport and supply chain configurations. *Applied Energy*, Volume 195, 1055–1070.
- Geleynse, S. B.-p. (2018).). The Alcohol-to-Jet Conversion Pathway for Drop-In Biofuels : Techno-Economic Evaluation. *Techno-Economic Evolution*, ChemSusChem, 3728–3741.
- Guolin Yao, M. D. (2017). Stochastic techno-economic analysis . *Biotechnology for Biofuels*, 10(1), 18.
- Hsun Chaoa, D. B. (2019). Carbon offsetting and reduction scheme with sustainable aviation fuel options: Fleet-level carbon emissions impacts for U.S. airlines. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 75, Pages 42-56.
- ICAO. (2019). *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA)* . ICAO. Tratto da <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/default.aspx>
- ICAO. (2021). CORSIA Default Life Cycle Emissions Values for . <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/ICAO%20document%2006%20-%20Default%20Life%20Cycle%20Emissions.pdf>.
- IEA Bioenergy Task 39. (2021). *Progress in Commercialization of Biojet /Sustainable Aviation Fuels (SAF): Technologies, potential and challenges*. <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2021/06/IEA-Bioenergy-Task-39-Progress-in-the-commercialisation-of-biojet-fuels-May-2021-1.pdf>.

- IMF. (2021). *WORLD ECONOMIC OUTLOOK*.
- IRENA. (2019). *Global energy transformation: A roadmap to 2050 (2019 edition)*. Abu Dhabi. Tratto da <https://www.irena.org/publications/2019/Apr/Global-energy-transformation-A-roadmap-to-2050-2019Edition>
- IRENA. (2021). Reaching Zero with Renewables: Biojet fuel. *International Renewable Energy Agency* (p. ISBN 978-92-9260-350-2). Abu Dhabi: <https://www.irena.org/publications/2021/Jul/Reaching-Zero-with-Renewables-Biojet-Fuels>.
- J.I. Hileman, R. (2014). Alternative jet fuel feasibility. *Transport Policy*, Volume 34, Pages 52-62.
- Karen Mayora, R. S. (2007). The impact of the UK aviation tax on carbon dioxide emissions and visitor numbers. *Transport Policy*, Volume 14, Issue 6-Pages 507-513.
- Katrinoesingmann. (2022). The effect of the European Emissions Trading System (EU ETS) on aviation demand: An empirical comparison with the impact of ticket taxes. *Energy Policy*, Volume 160, 112657.
- L.J.Wilcox, D. D. (2021). The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. *Atmospheric Environment*, Vol. 244/117834. Tratto da <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231020305689#>
- Mark D.Staples, R. P. (2018). Aviation CO2 emissions reductions from the use of alternative jet fuels. *Energy Policy*, Vol. 114/ pp.342-354.
- Neuling, U. &. (2018). Cost optimization of biofuel production – The impact of scale, integration, transport and supply chain configurations. *Fuel Processing Technology*, 10(1), 1–18.
- Nikita Pavlenko, S. S. (2019). The cost of supporting alternative jet fuel . *ICCT INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION*.
- Rafael S. Capaz, E. G. (2020). Mitigating carbon emissions through sustainable aviation fuels: costs and potential. *BioFpr*, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/bbb.2168>.
- Seamus J.Bann, R. M. (2017). The costs of production of alternative jet fuel: A harmonized stochastic assessment. *Bioresource Technology*, Volume 227/179-187.
- Tao, L. M. (2017). Techno-economic analysis for upgrading the biomass-derived ethanol-to-jet blendstocks. *Green Chemistry*, 19(4), 1082–1101.
- World Development Indicators, Data Bank (worldbank.org)

Ringraziamenti

Desidero ringraziare il Professor Carlo Cambini, relatore di questa tesi di laurea, per la sua immensa professionalità e tempestiva disponibilità mostratami. Un ringraziamento particolare va alla Professoressa Chiara Ravetti, correlatrice di questa tesi, per avermi supportata durante tutta la stesura, per i suoi preziosi suggerimenti e per aver chiarito ogni mio dubbio con estrema pazienza e gentilezza.

Inoltre, vorrei dedicare questo lavoro a tutta la mia famiglia.

Mami, Papi senza di voi nulla sarebbe stato possibile. Vorrei ringraziarvi per avermi dato sempre la libertà di scegliere e per avermi educata all'indipendenza e all'autodeterminazione. La fiducia è il regalo più grande che dei genitori possano fare ad una figlia e per questo non potrò esservi mai abbastanza grata.

Piccola Franci, grazie anche a te che con la tua anima pura sei una luce costante nella mia vita.

Vi amo immensamente.