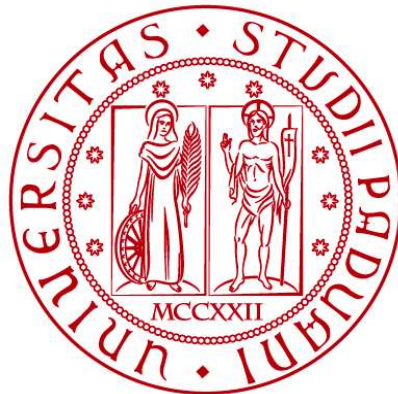


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE

Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di Laurea in
INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO



Tesi di Laurea

Impatto ambientale del settore dell'aviazione:
analisi delle emissioni e strategie per una
transizione sostenibile.

Relatore: Prof. Salvatore Pappalardo

Laureanda: Chiara Antonacci

ANNO ACCADEMICO 2022/2023

ABSTRACT

Il settore dell'aviazione rappresenta una fonte significativa di emissioni di gas serra e, con la crescente e continua domanda di viaggi aerei, è diventato urgente affrontare le sfide ambientali associate.

L'elaborato esamina l'impatto dell'aviazione sul cambiamento climatico, ponendo particolare attenzione alle emissioni di gas serra e alle strategie per una transizione sostenibile. Dopo aver delineato un quadro storico dell'aviazione, vengono analizzati gli inquinanti e i gas climalteranti emessi durante il volo, come l'anidride carbonica e gli ossidi di azoto. L'analisi si concentra sulla quantità di emissioni di CO₂ prodotte dall'aviazione e sul suo impatto nel panorama dei cambiamenti climatici. Si esaminano le emissioni attuali e le previsioni future, tenendo conto delle nuove tecnologie e delle politiche di riduzione.

Infine, vengono esplorate le strategie per una transizione sostenibile, con particolare riferimento all'adozione di biocarburanti, idrogeno e aeromobili elettrici. La ricerca ha evidenziato che, nonostante le attuali innovazioni e le politiche adottate, è fondamentale un impegno maggiore per garantire una significativa riduzione delle emissioni di CO₂.

INDICE

1. Introduzione	1
1.1 Contesto storico	1
1.2 Inquinanti e gas climalteranti	3
1.3 Emissioni nelle fasi operative	5
1.4 Obiettivi	8
2. Materiali e metodi.....	9
2.1 Materiali	9
2.2 Metodologia di ricerca	10
3. Risultati e discussione.....	11
3.1 Quantificazione delle emissioni di CO ₂ e previsioni.....	11
3.2 Politiche di riduzione	17
3.3 Efficientamento e propulsione alternativa	21
3.3.1 Aumento dell'efficienza.....	21
3.3.2 Sustainable Aviation Fuels.....	22
3.3.3 Aviazione elettrica.....	24
3.3.4 Idrogeno	27
3.4 Proiezioni future	31
4 Conclusioni	35
Bibliografia.....	39

1. Introduzione

1.1 Contesto storico

Per millenni, il desiderio di volare ha affascinato l'umanità ed ha ispirato le fantasie di molti uomini, come dimostra anche il mito greco di Icaro. Con l'avanzare della conoscenza e della tecnologia, alcuni uomini hanno iniziato a considerare il volo non più come una semplice fantasia, ma come un'esperienza che poteva diventare reale. Il primo progetto di una macchina volante si deve a Leonardo da Vinci e risale al XV secolo. Ispirato al volo degli uccelli, l'ornitottero di Leonardo proponeva di sorreggere un uomo in volo tramite il movimento di grandi profili alari. Sebbene non sia mai stato concretamente realizzato o testato, ad oggi è stato dimostrato che sarebbe stato impraticabile (Petrescu et al., 2017; Grant, 2017).

L'inizio dell'era dell'aviazione è comunemente attribuito all'anno 1783, quando i fratelli Montgolfier fecero volare la prima mongolfiera con a bordo esseri umani. Sebbene le mongolfiere, palloni aerostatici che sfruttano gas leggeri come l'idrogeno per sollevarsi nell'aria, fossero una rivoluzione per l'epoca, erano limitate nel controllare la direzione e la velocità. Presto il nuovo obiettivo divenne costruire macchine volanti più pesanti dell'aria che potessero essere controllate. Nel XIX secolo Sir George Cayley eseguì alcuni progressi scientifici fondamentali per la realizzazione di macchine volanti. I suoi studi sulle proprietà aerodinamiche delle ali, sulla stabilizzazione del volo e sulla portanza, posero le basi per l'aviazione moderna. Cayley comprese che le ali non servivano come mezzo di propulsione e progettò i primi modelli di macchine volanti ad ala fissa, come l'aliante noto oggi come "Cayley's Glider", che dimostravano i principi del volo controllato. Ma il vero cambiamento arrivò all'inizio del XX secolo con i fratelli Wright. Il 17 dicembre 1903 a Kitty Hawk, nel North Carolina, i fratelli Orville e Wilbur Wright, dopo anni di esperimenti e prototipi, effettuarono il primo volo controllato e sostenuto di un aereo a motore. Questo breve volo, che durò solo 12 secondi, segnò la nascita dell'aviazione motorizzata e stimolò rapidamente interesse verso gli aerei. Con l'avvento della Prima Guerra Mondiale la tecnologia aeronautica vide un notevole sviluppo. Gli aerei, inizialmente utilizzati solo per ricognizione, divennero rapidamente strumenti di combattimento e bombardamento (Petrescu et al., 2017).

Negli anni successivi al conflitto, si raggiunsero molti traguardi. Nel 1927, Charles Lindbergh completò il primo volo transatlantico tra New York e Parigi senza scali a bordo del suo aereo "Spirit of St. Louis" e, solo due anni dopo, nel 1929, il pilota australiano Charles Kingsford Smith eseguì il primo volo transpacifico senza scali dall'Australia alla California a bordo

dell'idrovolante Southern Cross. Nel 1935, Howard Hughes stabilì un nuovo record di velocità di 566 miglia all'ora (911 km/h) a bordo del suo Hughes H-1 Racer e nel 1939, il pilota sovietico Mikhail Gromov volò a un'altitudine di oltre 40.000 piedi (12.192 metri), aprendo la strada all'esplorazione della stratosfera. In questi stessi anni, cominciò ad emergere anche l'aviazione commerciale. Aerei come il Boeing 247 aprirono la strada a viaggi rapidi e confortevoli su tratte a lunga percorrenza e compagnie aeree come la Pan American World Airways e la KLM introdussero i primi voli transatlantici, trasformando il mondo in una comunità globale sempre più interconnessa. Con l'avvento della Seconda Guerra Mondiale gli aeromobili divennero più veloci, più potenti e capaci di trasportare carichi sempre più pesanti. Il comparto aereo costituiva ormai un elemento fondamentale della potenza bellica dei vari stati, con flotte che potevano raggiungere migliaia di aeromobili.

Nel periodo successivo alla guerra, l'industria dell'aviazione continuò a prosperare, offrendo viaggi aerei sempre più veloci ed efficienti. L'entrata nell'era digitale portò ulteriori innovazioni nell'aviazione, con l'adozione di sistemi di navigazione avanzati, controlli fly-by-wire e una crescente automazione che migliorò sensibilmente la sicurezza e l'efficienza dei voli. Gli anni '70 e '80, caratterizzati da una crescita economica stabile in molte nazioni, registrarono un significativo aumento nella domanda di viaggi aerei. L'avvento dell'era dei viaggi supersonici con il Concorde e il Tupolev Tu-144, insieme all'introduzione di aeromobili a fusoliera larga come il Boeing 747 e l'Airbus A380, aprirono la strada al trasporto aereo su larga scala, consolidando così l'aviazione come un pilastro fondamentale dell'economia globale e un catalizzatore chiave per la connettività internazionale (Grant, 2017).

La costante crescita dei viaggi aerei ha portato l'industria dell'aviazione a rappresentare una significativa fonte di emissioni di gas serra a livello globale. Oggi, questa industria è chiamata ad affrontare nuove sfide legate all'efficienza energetica e alla sostenibilità ambientale, che la spingono a cercare soluzioni più ecologiche e innovative per adeguarsi alle esigenze del pianeta (IEA, 2023).

1.2 Inquinanti e gas climalteranti

I motori degli aeromobili, durante il volo, emettono una varietà di sostanze che hanno impatti variabili ma significativi sul clima. Tra i principali inquinanti ci sono: anidride carbonica (CO_2), ossidi di azoto (NO_x), ossidi di zolfo (SO_x), vapore acqueo (H_2O), monossido di carbonio (CO), idrocarburi non combustibili (HC) e fuliggine (IPCC, 1999; Lee et al., 2021).

La CO_2 rappresenta la principale fonte di emissione nell'ambito dell'aviazione. Essendo un gas serra, il suo accumulo contribuisce all'effetto serra stesso, trattenendo il calore nell'atmosfera e causando incrementi nelle temperature globali.

Per quanto riguarda le emissioni di ossidi di azoto (NO_x), queste non hanno un impatto diretto, ma interagendo con altri gas, generano un effetto indiretto di forcing radiativo. Al momento del loro rilascio nell'atmosfera, possono reagire con altre sostanze chimiche, contribuendo alla formazione dell'ozono (O_3) troposferico a breve termine, il quale costituisce un rilevante gas serra. Parallelamente, gli ossidi di azoto possono avere effetti positivi, in quanto sono in grado di ridurre la quantità di metano (CH_4) presente nell'atmosfera, un altro gas serra estremamente potente (Lee et al., 2009; Lee et al., 2021).

Il processo di combustione del carburante nei motori aerei provoca l'ossidazione dello zolfo contenuto nel carburante stesso, generando come sottoprodotto il biossido di zolfo (SO_2). Il SO_2 può reagire con l'ossigeno presente nell'aria per formare acido solforico (H_2SO_4), il quale si condensa in minuscole particelle liquide note come aerosol solforati. Gli aerosol influenzano la formazione delle nuvole poiché agiscono come nuclei di condensazione per le goccioline d'acqua. Gli aerosol solforati presentano un impatto climatico complesso: da un lato, riflettono la radiazione solare, contribuendo al raffreddamento della Terra; tuttavia, possono altresì intrappolare la radiazione infrarossa emessa dalla Terra, contribuendo all'effetto serra. L'equilibrio tra i due effetti determina un forzante radiativo efficace netto negativo sul clima (IPCC, 1999; Lee et al., 2009; Lee et al., 2021).

Allo stesso modo, la fuliggine emessa dalla combustione influenza la formazione delle nuvole agendo come nuclei di condensazione per le goccioline d'acqua. Tuttavia, il loro forzante radiativo netto è positivo, il che implica un contributo al riscaldamento climatico complessivo (Lee et al., 2021).

Un altro impatto causato dall'aviazione riguarda le emissioni di vapore acqueo. Il vapore costituisce un elemento naturale dell'atmosfera e riveste un ruolo essenziale all'interno del sistema climatico terrestre. Si tratta del principale gas serra presente nell'atmosfera e

contribuisce all'effetto serra mediante l'assorbimento della radiazione infrarossa. Le rotte di volo degli aerei possono incidere sulla distribuzione del vapore acqueo e delle formazioni nuvolose in diverse regioni, generando impatti sulle condizioni meteorologiche sia locali che regionali e influenzando precipitazioni e temperature (IPCC, 1999; Lee et al., 2009; Lee et al., 2021).

Inoltre, sia il vapore acqueo che gli aerosol concorrono alla formazione delle scie di condensazione in aree ad alta umidità. Le scie possono evolversi in cirri, che rappresentano formazioni nuvolose che hanno un forcing radiativo molto elevato (Kärcher, 2018).

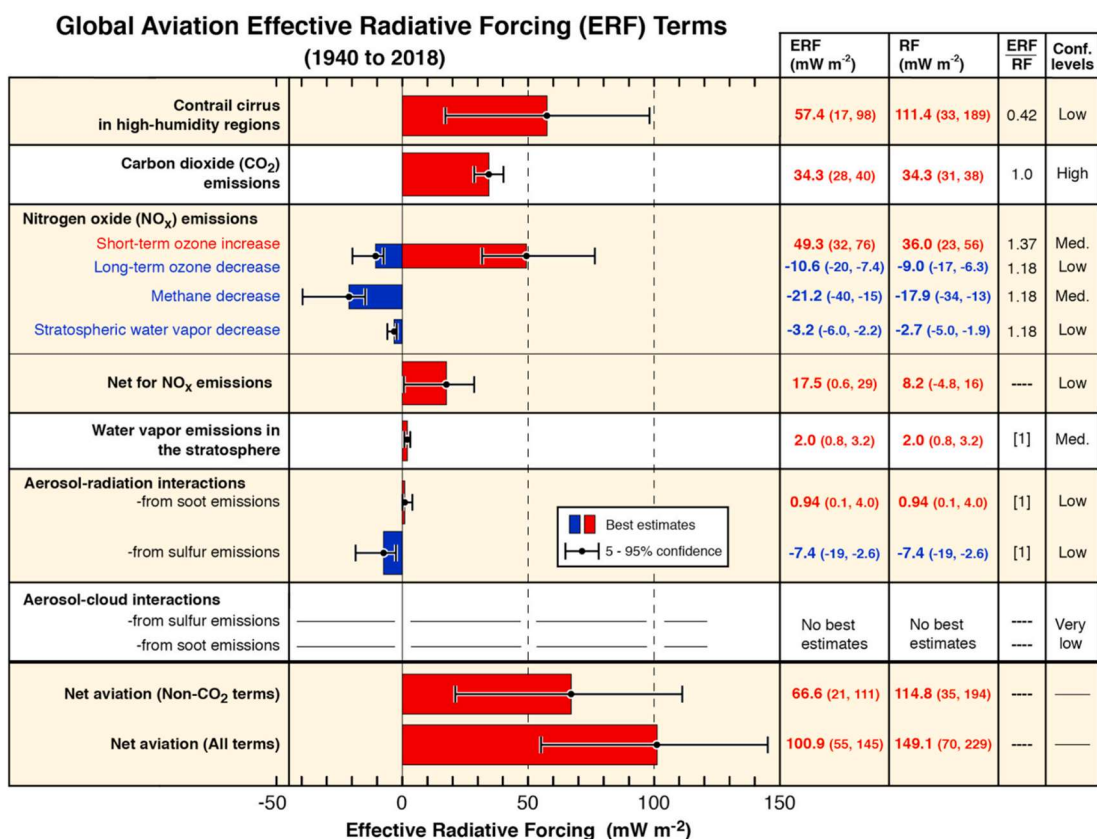


Figura 1 Stime delle forzanti climatiche dell'aviazione globale nel periodo dal 1940 e il 2018 (Lee et al., 2021).

Alcuni studi, come mostra Figura 1, hanno rilevato che gli effetti derivanti dai forzanti non legati alla CO₂ rappresentano il doppio dell'impatto della CO₂ stessa. Complessivamente l'effetto dell'aviazione sul riscaldamento globale rappresenta il 3,5% del forzante radiativo efficace (Lee et al., 2021).

È importante però sottolineare che, mentre gli impatti diretti delle emissioni, come quelli associati alla CO₂ sono relativamente ben compresi e quantificati, gli effetti indiretti presentano una maggiore incertezza. Ciò è attribuibile alla complessità dei processi atmosferici coinvolti e alla necessità di ulteriori ricerche per una comprensione completa di tali meccanismi (EASA, 2022; Lee et al., 2021).

1.3 Emissioni nelle fasi operative

La comprensione delle fasi operative di un volo è fondamentale per analizzare e ottimizzare il consumo di carburante e le emissioni di gas serra (GHG). Ogni fase ha un impatto ambientale specifico, determinato dalle specifiche caratteristiche operative. Un volo completo si articola in nove fasi: *taxi-out*, decollo, salita iniziale, salita, crociera, discesa, avvicinamento, atterraggio e *taxi-in*. Queste fasi possono essere suddivise in due cicli principali: il ciclo atterraggio/decollo (LTO) e il ciclo salita/crociera/discesa (CCD) (Liao et al., 2021).

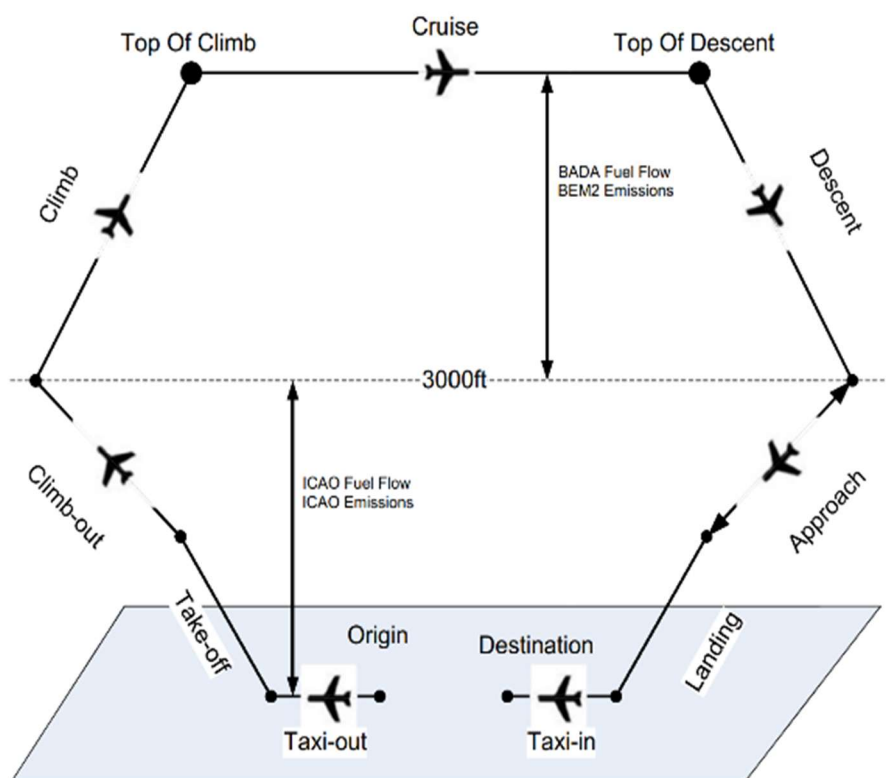
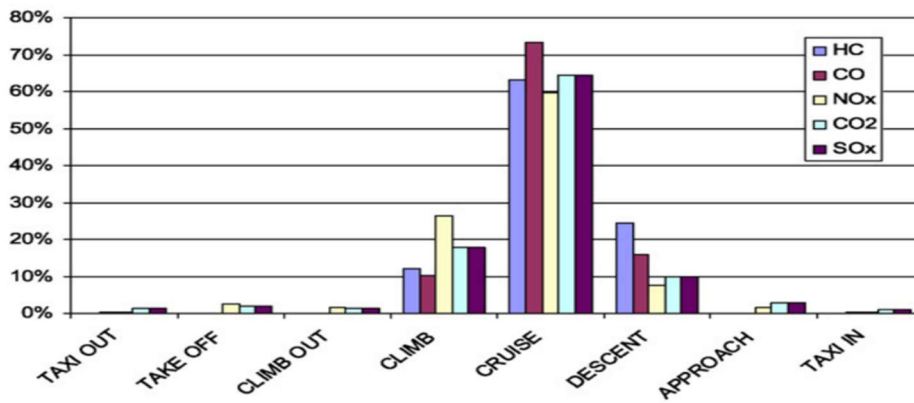
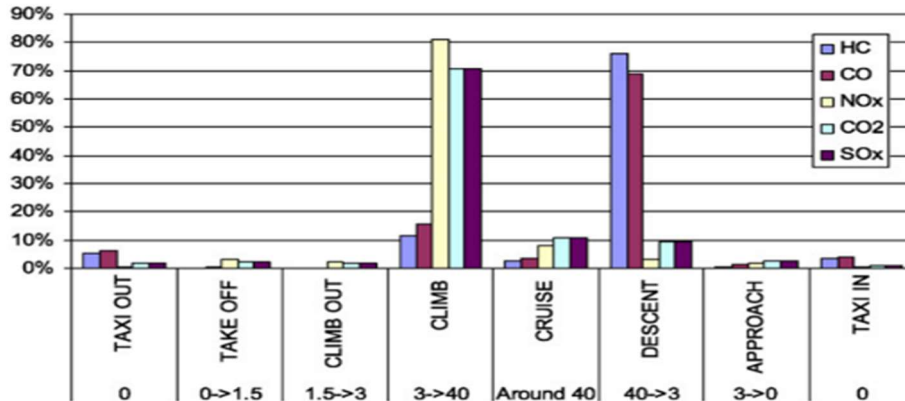


Figura 2 Fasi del volo (Pham et al., 2010).

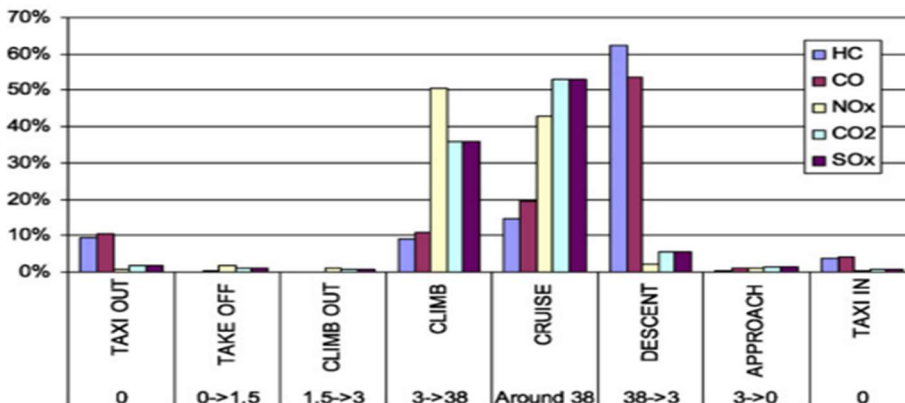
Il ciclo LTO riguarda le operazioni svolte al di sotto dei 3000 piedi (circa 914 metri) e comprende taxi-out, decollo, salita iniziale, avvicinamento, atterraggio e taxi-in. Al contrario, il ciclo CCD copre le operazioni al di sopra dei 3000 piedi, includendo le fasi di salita, crociera e discesa. Un'analisi basata su quasi 500 mila voli, sia nazionali che internazionali, effettuati in Australia, ha messo in luce che il ciclo CCD è responsabile di circa il 90% delle emissioni totali, principalmente a causa della sua durata prolungata rispetto al ciclo LTO. In particolare, la fase di crociera emerge come la più impattante, contribuendo per oltre il 60% delle emissioni totali, seguita da salita e discesa (Pham et al., 2010).



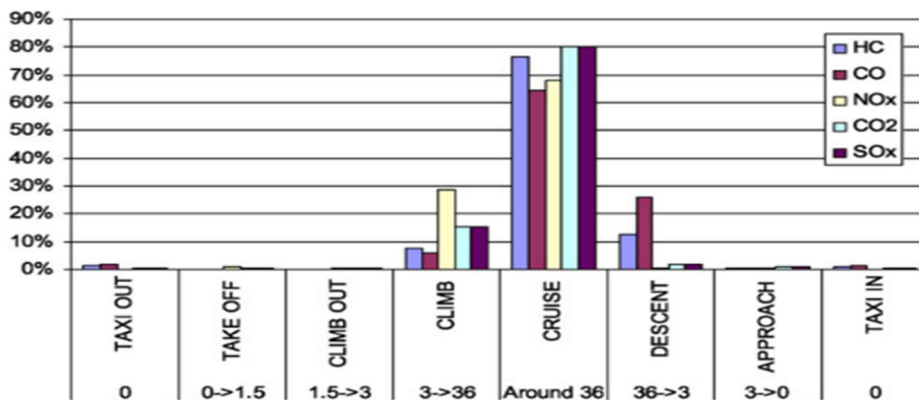
Emission phase distribution of all flights in the study period.



Emission phase distribution of a short distance flight.



Emission phase distribution of a medium distance flight.



Emission phase distribution of a long distance flight.

Figura 3 Distribuzione delle emissioni nelle diverse fasi di volo, differenziati per la lunghezza del volo (Pham et al., 2010).

Esaminando i grafici che differenziano le emissioni in base alla lunghezza del volo, si osserva che:

- Nei voli brevi, la fase di salita è caratterizzata da elevate emissioni di ossidi di azoto (NO_x), anidride carbonica (CO_2) e ossidi di zolfo (SO_x), mentre la fase di discesa vede un picco nelle emissioni di idrocarburi (HC) e monossido di carbonio (CO).
- Per quanto riguarda i voli di media lunghezza, la fase di crociera presenta il massimo delle emissioni di CO_2 e SO_x . Le emissioni di NO_x , invece, sono equamente distribuite tra crociera e salita, mentre HC e CO raggiungono il loro apice nella fase di discesa.
- Nei voli a lunga distanza, la fase di crociera risulta essere la più impattante in termini di emissioni, principalmente a causa della sua maggiore durata rispetto alle altre fasi (Pham et al., 2010)

Durante le fasi LTO, si registra un'alta concentrazione di emissioni di CO e HC rispetto ad altri inquinanti. Questo fenomeno è dovuto alla combustione non ottimale del carburante poiché i motori sono progettati principalmente per le condizioni operative delle fasi CCD (Liao et al., 2021). Sebbene le emissioni delle fasi LTO siano generalmente marginali in termini di quantità rispetto alle fasi CCD, la loro rilevanza aumenta con voli più brevi. È fondamentale sottolineare che, poiché le emissioni LTO avvengono vicino al suolo, influenzano direttamente la qualità dell'aria nelle vicinanze degli aeroporti, influenzando direttamente sulla salute delle comunità limitrofe, specialmente in zone densamente popolate o con un intenso traffico aereo (Liao et al., 2021).

Un report dell'EPA del 2014 evidenzia i rischi per la salute legati agli inquinanti di cui si è discusso. Gli ossidi di azoto, ad esempio, favoriscono la formazione di smog e ozono, dannoso per il tessuto polmonare. Il diossido di azoto (NO_2) può causare irritazioni polmonari, predisponendo a bronchite o polmonite e riducendo la resistenza a infezioni respiratorie. Il biossido di zolfo (SO_2) incide negativamente sul sistema respiratorio, può peggiorare le condizioni cardiovascolari ed è associato a patologie come asma, bronchite ed enfisema. CO e HC sono coinvolti nella formazione di smog e ozono. Il CO, una volta assorbito, ostacola il trasporto di ossigeno nel corpo, rappresentando un rischio per chi ha patologie cardiovascolari. Infine, il CO_2 ha principalmente un impatto sul clima, ma non presenta rischi diretti per la salute (Liao et al., 2021).

1.4 Obiettivi

L'obiettivo primario di questo elaborato è quello di indagare la portata delle emissioni di CO₂ derivanti dal settore dell'aviazione sull'ambiente e sulla necessità di esaminare il suo ruolo nel contesto dei cambiamenti climatici.

Per raggiungere l'obiettivo, verranno approfonditi due aspetti importanti:

1. **Analisi delle emissioni:** questa fase coinvolgerà l'esame degli impatti ambientali causati dalle emissioni di anidride carbonica prodotte dal settore dell'aviazione. Questo processo comprenderà un'analisi sia delle emissioni attuali che delle proiezioni future, tenendo conto non solo delle condizioni attuali, ma anche delle prospettive di sviluppo delle tecnologie aeronautiche, dei modelli di viaggio e delle politiche di mitigazione, fornendo una visione completa degli impatti climatici del settore.

2. **Strategie per una transizione sostenibile:** in questa sezione, verranno esaminate e valutate le strategie più promettenti per la riduzione delle emissioni di CO₂ nell'industria dell'aviazione. Si terranno in considerazione sia le strategie già in atto che quelle potenzialmente realizzabili in futuro. Tale analisi comprenderà ottimizzazioni operative, come il massimizzare la capacità di carico, il perfezionamento delle rotte e l'adozione di miglioramenti aerodinamici. Inoltre, saranno prese in considerazione le politiche di regolamentazione e alcune iniziative settoriali intraprese per promuovere una transizione verso un'industria più sostenibile. Infine, si esamineranno le tecnologie di propulsione emergenti, tra cui biocarburanti, idrogeno e aeromobili elettrici.

2. Materiali e metodi

2.1 Materiali

Questo lavoro è il risultato di una ricerca basata su un'ampia analisi della letteratura scientifica internazionale, della letteratura grigia e di report ufficiali. L'obiettivo primario è esplorare in profondità il complesso rapporto tra l'industria dell'aviazione e il cambiamento climatico.

Le fonti di dati e le risorse consultate per condurre questa ricerca includono:

Articoli scientifici: sono state condotte ricerche sul tema utilizzando banche dati di riferimento, come *Scopus* e *Web of Science*. Questi database hanno consentito l'accesso a una vasta gamma di articoli scientifici pubblicati su riviste specializzate che trattano temi chiave quali le emissioni di inquinanti e gas climalteranti nell'industria dell'aviazione e sulle tecnologie innovative per ridurre le emissioni di CO₂. Gli studi selezionati riflettono l'attuale pensiero scientifico e tecnologico.

Pubblicazioni accademiche di riferimento: sono state consultate pubblicazioni accademiche di riferimento nel campo dell'aviazione e del cambiamento climatico. Questi lavori, noti per la loro autorevolezza e completezza, hanno contribuito a definire il quadro teorico della ricerca e a identificare i temi centrali da indagare.

Report di organizzazioni internazionali: sono stati presi in considerazione report pubblicati da autorevoli organizzazioni internazionali, tra cui l'Organizzazione dell'Aviazione Civile Internazionale (ICAO) e il Gruppo Intergovernativo sul Cambiamento Climatico (IPCC). Questi report offrono una visione globale delle tendenze, delle politiche e delle raccomandazioni relative all'industria dell'aviazione e al cambiamento climatico.

Fonti web di agenzie governative: sono state esaminate risorse online fornite da agenzie governative e altri organismi di regolamentazione. Gli enti hanno fornito dati aggiornati, normative e iniziative di regolamentazione ambientale legate all'industria dell'aviazione, offrendo una prospettiva pratica e normativa.

Pubblicazioni storiche e di riferimento: sono state consultate anche opere storiche e di riferimento nel campo dell'aviazione, che hanno consentito di studiare il contesto storico e lo sviluppo dell'industria.

Altre risorse settoriali: sono state incluse anche alcune risorse di settore per ricavare dati e analisi specifiche sull'argomento trattato.

Questo approccio multidisciplinare ha permesso di sviluppare un elaborato solido e basato su fonti autorevoli, che riflette le conoscenze più aggiornate e le dinamiche in evoluzione nell'ambito delle emissioni dell'industria dell'aviazione e il loro impatto sul cambiamento climatico. La combinazione di fonti scientifiche, dati normativi e risorse di riferimento ha fornito un quadro completo per affrontare la complessità di questo tema.

2.2 Metodologia di ricerca

Per condurre un'analisi esaustiva e accurata, sono state utilizzate diverse fonti di informazione come articoli scientifici, pubblicazioni accademiche, pubblicazioni storiche, report di organizzazioni internazionali, fonti web di agenzie governative e altre risorse settoriali.

Per reperire articoli scientifici *peer-reviewed* relativi alle emissioni di inquinanti e gas serra causate dall'aviazione, sono state consultate fonti di letteratura accademica come *Scopus* e *Web of Science*. La selezione si è basata su parole chiave specifiche, quali "*aviation emissions*", "*sustainable aviation transition*", "*sustainable air transport*" e "*aircraft emissions reduction strategies*". A partire dalla lettura dei risultati, sono stati estratti ulteriori articoli di interesse dalla bibliografia, permettendo di approfondire specifiche tematiche.

Inoltre, è stata presa in considerazione anche letteratura grigia, compresi report di organizzazioni internazionali, documenti governativi, pubblicazioni storiche e di riferimento, risorse settoriali, fonti web. Sia per fornire dati ufficiali e informazioni sulle politiche globali relative all'aviazione e alle emissioni di gas serra che per ottenere dati aggiuntivi o approfondimenti non pubblicati altrove.

Per la selezione delle fonti, è stato seguito un processo basato su tre criteri principali: autorevolezza, rilevanza e attualità. Sono state selezionate le fonti ritenute più affidabili ed autorevoli, con una preferenza per pubblicazioni sottoposte a revisione paritaria o report ufficiali provenienti da organizzazioni internazionali riconosciute. Inoltre, è stata prestata particolare attenzione alla scelta di fonti direttamente pertinenti all'argomento del cambiamento climatico causato dall'aviazione e alle emissioni di gas serra. È stato essenziale assicurarsi che le informazioni contenute nelle fonti fossero aggiornate e rilevanti nel contesto attuale, sia dal punto di vista scientifico che politico. Di conseguenza, le fonti che non soddisfacevano tali requisiti sono state escluse dall'analisi.

Dopo aver raccolto le fonti, è stata condotta un'attenta analisi per estrarre dati rilevanti e informazioni chiave. Inoltre, è stata condotta un'analisi critica per individuare eventuali bias o limitazioni nei dati e nelle informazioni.

3. Risultati e discussione

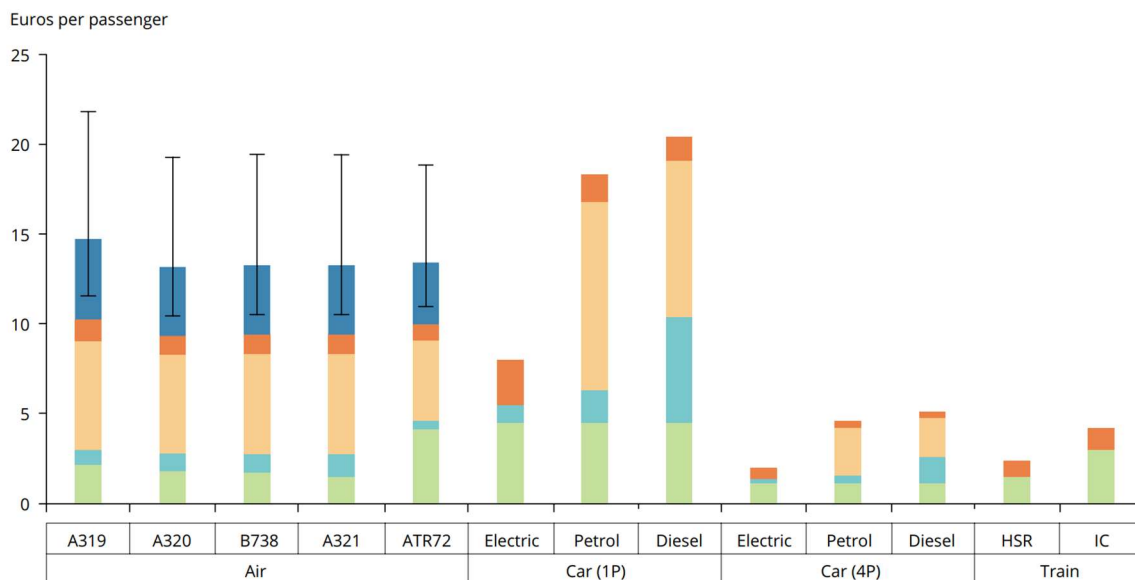
3.1 Quantificazione delle emissioni di CO₂ e previsioni

Dal momento in cui l'aereo decolla, si solleva in aria e continua la sua fase di crociera, i motori bruciano il carburante per generare energia. Durante la combustione, il carburante reagisce con l'ossigeno presente nell'atmosfera producendo calore ed energia necessari per mantenere in moto l'aereo; da questa reazione viene prodotta anche l'anidride carbonica (CO₂) che viene rilasciata in atmosfera attraverso i gas di scarico dell'aereo.

Nel 2022 l'aviazione è stata responsabile circa del 2% delle emissioni globali di CO₂, producendo 800 Mt di CO₂. In riferimento al settore dei trasporti, che ha contribuito emettendo 8 Gt di (CO₂), i viaggi su strada hanno rappresentato il 74%, seguiti dal trasporto marittimo (11%) e dall'aviazione (10%), mentre il trasporto ferroviario ha rappresentato solo l'1% delle emissioni. (IEA, 2023).

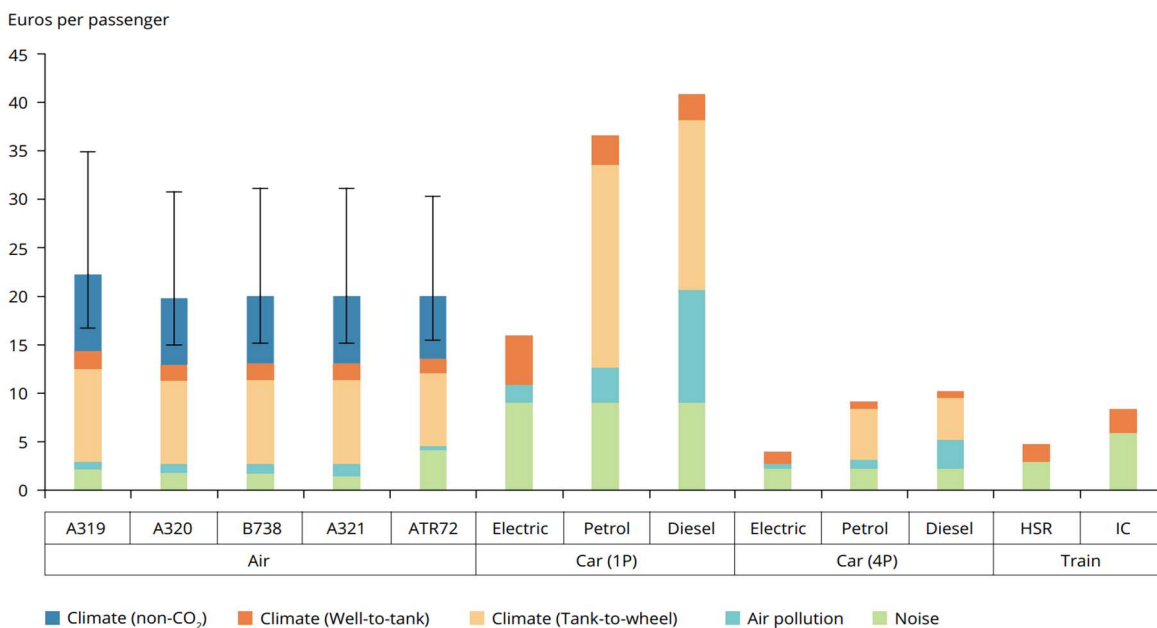
Tali percentuali dipendono sia dalla frequenza d'uso del mezzo di trasporto che dalle sue emissioni specifiche. Anche se i mezzi su strada contribuiscono maggiormente alle emissioni totali a causa del diffuso utilizzo, è importante sottolineare che le emissioni di un singolo volo aereo possono essere superiori, a causa delle maggiori emissioni specifiche dell'aviazione (EEA, 2020).

Nel rapporto del 2020 "*Transport and Environment Report 2020 - Train or Plane?*", l'EEA valuta gli impatti ambientali espressi in termini di emissioni per passeggero-chilometro per varie modalità di trasporto: cinque tipi di aeromobili comuni, treni interurbani (IC) e treni ad alta velocità (HSR) e tre tipi di veicoli automobilistici (diesel, benzina ed elettrici), con un tasso di occupazione di una persona e di quattro persone per ciascuna tipologia di automobile. Oltre alle emissioni di CO₂, lo studio tiene conto, con un certo grado di incertezza, anche dei costi ambientali aggiuntivi associati all'aviazione.



Note: The error bars reflect the uncertainty for the non-CO₂ climate costs of aviation based on Cox and Althaus (2019). Occupancy rates: aircraft 80 %; HSR 66 %; IC (intercity train) 36 %.

Figura 4 Costi delle emissioni dei diversi mezzi di trasporto per una distanza di 500 km (EEA, 2020).



Note: The error bars reflect the uncertainty for the non-CO₂ climate costs of aviation based on Cox and Althaus (2019). Occupancy rates: aircraft 80 %; HSR 66 %; IC (intercity train) 36 %.

Figura 5 Costi delle emissioni dei diversi mezzi di trasporto per una distanza di 1000 km (EEA, 2020).

I risultati evidenziano che i viaggi in aereo generano costi di emissione fino a sei volte superiori rispetto ai viaggi in HSR, che emerge come l'opzione più sostenibile grazie all'alta occupazione dei treni. Al contrario, viaggiare in auto con quattro passeggeri (indipendentemente dal tipo di carburante) riduce notevolmente i costi di emissione per passeggero rispetto all'aereo. Tuttavia, è importante sottolineare che il viaggio in auto con un solo passeggero comporta i costi di emissione più elevati tra tutte le opzioni considerate. Un

elemento chiave nell'analisi è il tasso di occupazione: un viaggio su distanze di 500 km in un'auto occupata da quattro persone può avere emissioni confrontabili con un treno IC avente un tasso di occupazione del 36%. È importante osservare che, su distanze più lunghe, i costi ambientali del viaggio aereo aumentano meno che proporzionalmente, poiché su voli diretti i costi associati all'atterraggio e al decollo rimangono costanti. Tuttavia, il rapporto mostra che, anche su distanze di 1000 km, i costi ambientali per passeggero-chilometro di un viaggio aereo restano notevolmente superiori rispetto al trasporto ferroviario. È inoltre opportuno evidenziare che le conclusioni si basano sulle condizioni e le tecnologie attuali e riflettono la situazione al momento della loro pubblicazione. Tuttavia, il panorama dei trasporti e delle tecnologie è in costante evoluzione e la performance ambientale del trasporto aereo in futuro dipenderà da ulteriori progressi tecnici nella progettazione e tecnologia degli aeromobili, tra cui l'eventuale adozione di aeromobili elettrici, ibridi o a idrogeno, nonché miglioramenti nella gestione del traffico aereo o nelle operazioni di trasporto e l'adozione di carburanti per l'aviazione sostenibili (EEA, 2020).

Nonostante esistano delle prospettive per ridurre le emissioni del settore dell'aviazione, la loro applicazione immediata non è possibile e richiederà diverso tempo (IPCC, 2022). In particolare, entro il 2070, si prevede che ci sia ancora una dipendenza dai combustibili fossili e che le emissioni di CO₂ diminuiranno del 60% rispetto ai livelli del 2019, continuando a fornire un apporto non trascurabile (Fleming et al., 2022).

Nonostante brevi interruzioni dovute a eventi come la Guerra del Golfo, l'attentato dell'11 Settembre e la crisi finanziaria del 2008, il settore dell'aviazione ha sempre mostrato una forte tendenza di crescita. Infatti, dal 1990 al 2019 le emissioni di CO₂ sono aumentate in media del 2,3% all'anno, fino a raggiungere il picco di 1004 Mt CO₂; inoltre, se si considera il solo periodo 2010-2019, l'aumento medio annuo è del 3,9%. Nel 2020, a causa della pandemia COVID-19 sono precipitate a 600 Mt CO₂, per poi aumentare nuovamente nel 2021, anno in cui hanno raggiunto 720 Mt CO₂ recuperando quasi un terzo del calo registrato nell'anno precedente. Nel 2022 la domanda è continuata ad aumentare in quasi tutti gli Stati, raggiungendo quasi l'80% del picco pre-pandemia (IEA, 2023).

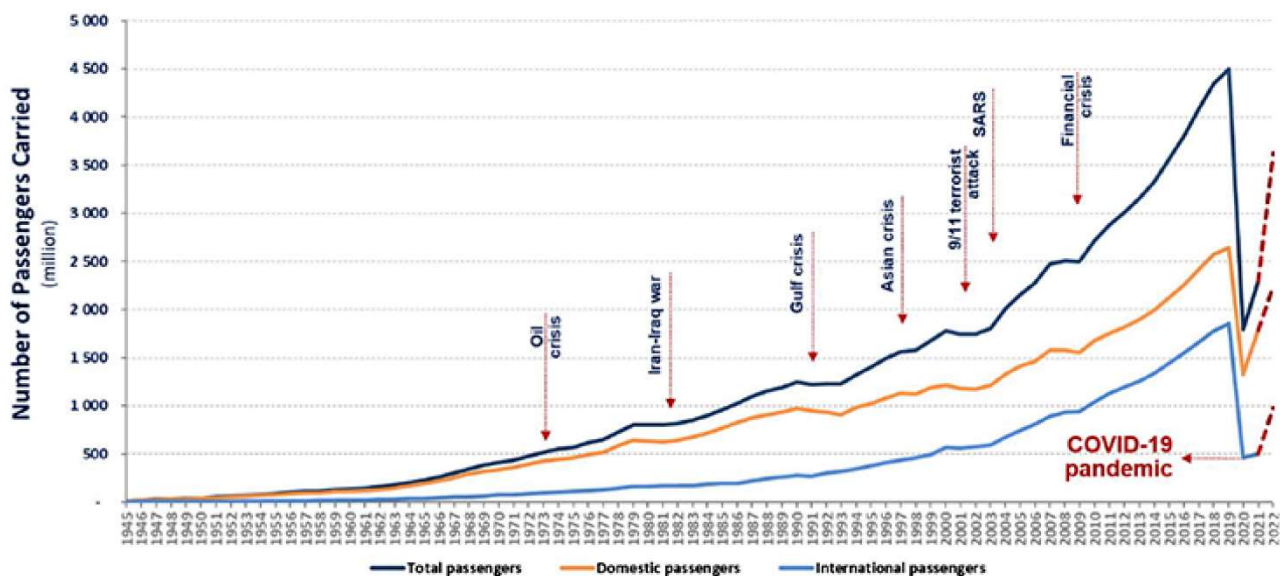


Figura 6 Passeggeri globali trasportati dal 1945 al 2022 e proiezioni (Cabrera & Melo de Sousa, 2022).

Nel 2022, alcune previsioni dell'ICAO suggerivano che tra il 2023 e il 2027 si sarebbero raggiunti e superati nuovamente i livelli del 2019 (Fleming et al., 2022). Nonostante la rapida ripresa, le proiezioni a lungo termine indicano che gli effetti della pandemia continueranno a farsi sentire. Si prevede un aumento costante della domanda, ma si stima che l'impatto della pandemia porterà a una riduzione dell'8% nella domanda di traffico aereo passeggeri entro il 2050, rispetto agli studi condotti prima dell'emergenza sanitaria (Cabrera & Melo de Sousa, 2022).

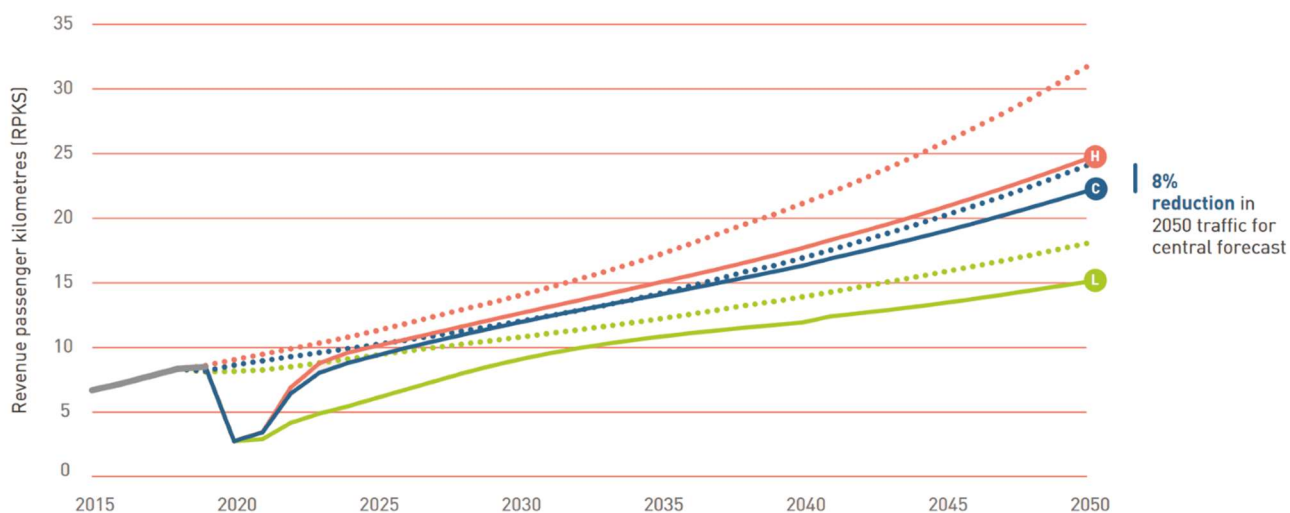


Figura 7 Tendenze e proiezioni nel settore dell'aviazione: impatto della pandemia di COVID-19 sul traffico passeggeri (Cabrera & Melo de Sousa, 2022).

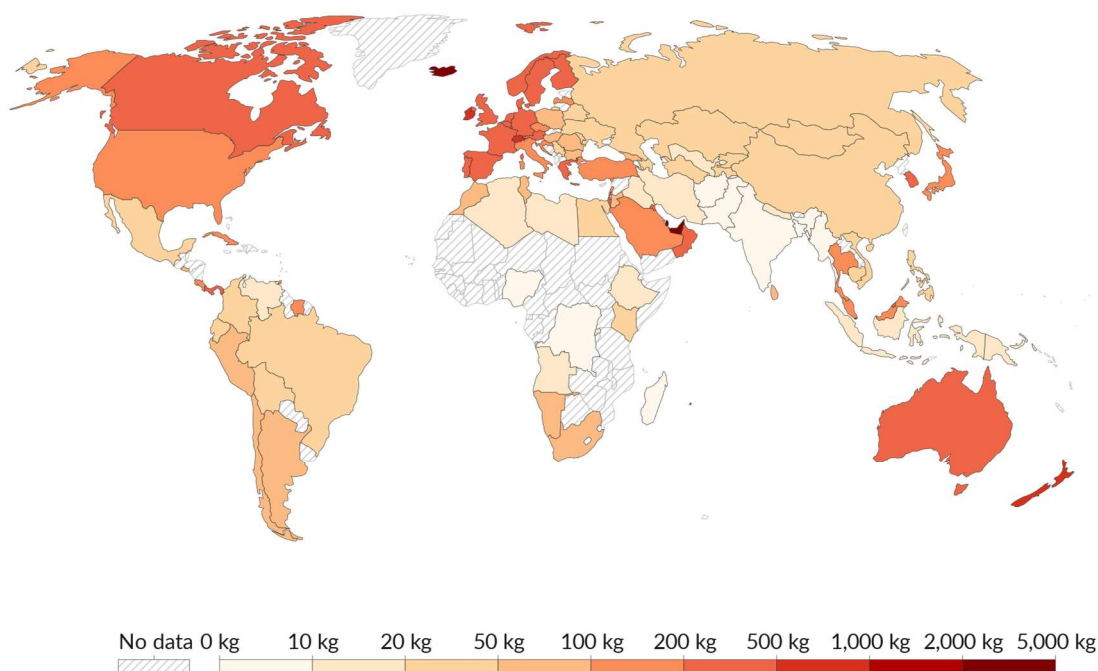
Un ulteriore aspetto da considerare nell'analisi delle emissioni nel settore dell'aviazione riguarda la suddivisione delle emissioni derivanti dai voli internazionali. Mentre le emissioni dei voli nazionali sono incluse nei report obbligatori, i voli internazionali sono classificati in una categoria a sé stante: *bunker fuels*. Nel tentativo di studiare le emissioni per ciascun Paese, emerge una complessità nel determinare come assegnare i dati relativi a un volo internazionale. Non è immediatamente chiaro come tali valori debbano essere equamente suddivisi tra i Paesi coinvolti. Di fatto, optare per una suddivisione semplice, basata sulla nazione di partenza o di arrivo, penalizzerebbe le nazioni meno sviluppate.

In un articolo per *l'International Council on Clean Transportation*, Sola Zheng suggerisce di tener conto del turismo, moltiplicando le emissioni dei voli internazionali per il rapporto tra viaggiatori in entrata e viaggiatori in uscita per ciascuno Stato (Zheng, 2019).

Per capita CO₂ emissions from international aviation, 2018

International aviation emissions are here allocated to the country of departure of each flight.

Our World
in Data



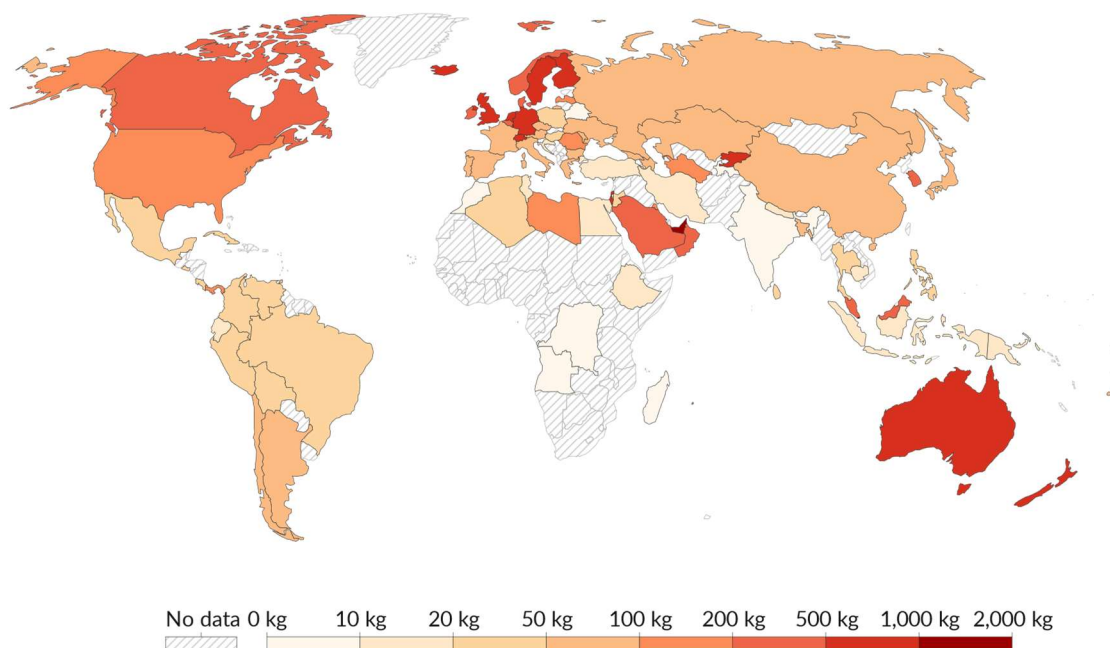
Source: Graver, Zhang & Rutherford (2019). International Council of Clean Transportation (ICCT).

CC BY

Figura 8 Emissioni pro capite di CO₂ dai voli internazionale del 2018 (Ritchie, 2023)

Per capita CO₂ emissions from international flights, tourism-adjusted, 2018

International aviation emissions are allocated to the country of departure, then adjusted for tourism by multiplying this figure by the ratio of inbound-to-outbound travelers. This attempts to distinguish between locals traveling abroad and foreign visitors traveling to that country on the same flight.



Source: Calculated by Our World in Data based on Graver et al. (2019) and World Bank

OurWorldInData.org/tourism • CC BY

Figura 9 Emissioni pro capite di CO₂ dai voli internazionali del 2018, con la correzione per il turismo (Ritchie, 2023).

Dal confronto si osserva che nei Paesi più ricchi, in cui il turismo in uscita è elevato, con l'utilizzo della correzione proposta le emissioni aumentano. D'altra parte, utilizzando lo stesso approccio per i Paesi più poveri, in cui il turismo è prevalentemente in entrata, le emissioni diminuiscono. A tal proposito, è opportuno tenere in considerazione che i cittadini nel mondo non volano allo stesso modo e una grande parte della popolazione mondiale non effettua voli aerei. Secondo uno studio di Gössling e Humpe (2020), nel 2018 l'11% della popolazione mondiale ha viaggiato in aereo e solo il 4% ha effettuato voli internazionali; inoltre, solo l'1% della popolazione mondiale è responsabile del 50% delle emissioni di CO₂ dell'intero settore.

Il problema è dato dal fatto che l'aumento di domanda nel settore cresce più in fretta rispetto al miglioramento tecnologico: nel periodo che va dal 2000 al 2019 la domanda di passeggeri è cresciuta di oltre il 5% all'anno (EASA, 2022), a fronte di una riduzione media del consumo di carburante per passeggero/km dell'1,3% dal 1960 al 2014 (Kharina & Rutherford, 2015).

Global airline traffic and aviation efficiency

Revenue passenger kilometers (RPK) measures the number of paying customers multiplied by the distance traveled. Available seat kilometers (ASK) measures the total number of seats available. The ratio between RPK and ASK measures the passenger load factor. Aviation efficiency data does not include non-CO₂ climate forcings, or a multiplier for warming effects at altitude.

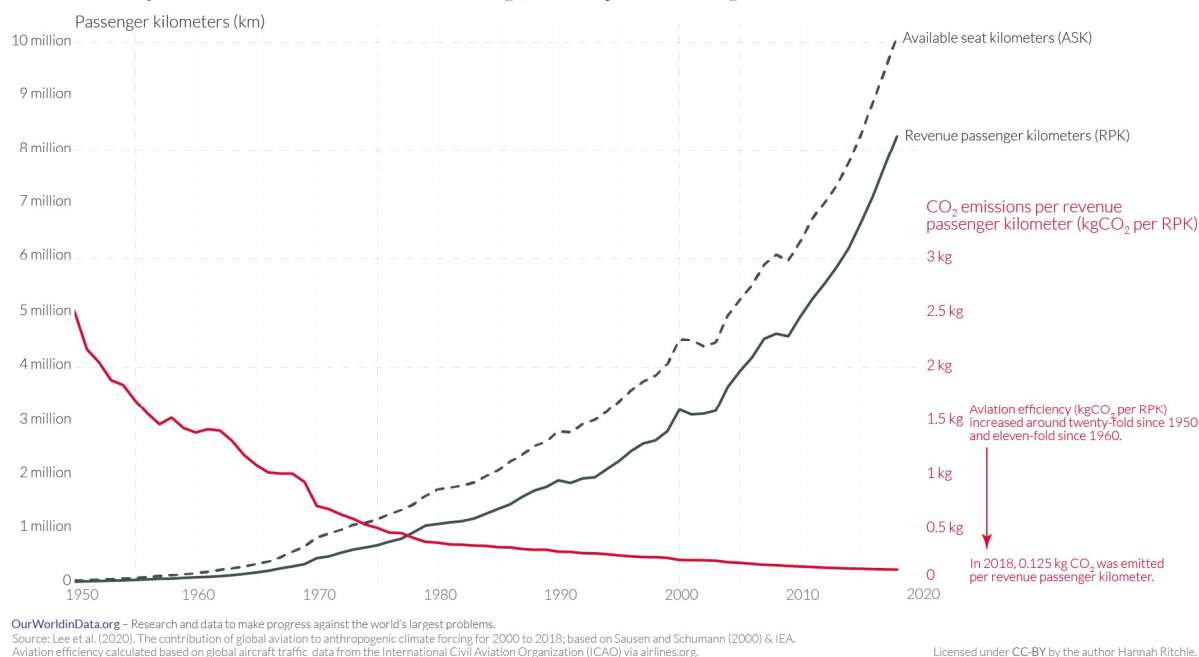


Figura 10 Traffico globale ed efficienza dell'aviazione (Ritchie, 2020)

3.2 Politiche di riduzione

La crescente consapevolezza del cambiamento climatico ha indotto le politiche internazionali ad interessarsi alle emissioni di gas serra. Uno dei primi accordi raggiunti a livello internazionale è stato il Protocollo di Kyoto, il quale è stato sottoscritto nel 1997 nel contesto della Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (UNFCCC). Entrato in vigore il 16 febbraio 2005, esso rappresenta un importante passo in avanti nella lotta contro il riscaldamento globale, perché contiene obiettivi vincolanti e quantificati di limitazione e riduzione dei gas ad effetto serra. I gas serra soggetti a limitazione all'interno del Protocollo di Kyoto sono i seguenti (ISPRA, n.d.):

- Biossido di carbonio (CO₂)
- Metano (CH₄)
- Protossido di azoto (N₂O)
- Idrofluorocarburi (HFCs)
- Perfluorocarburi (PFCs)
- Esafluoro di zolfo (SF₆)

A livello globale, il Protocollo di Kyoto impone agli Stati industrializzati firmatari l'obbligo di ridurre le emissioni di gas serra nel periodo 2008-2012, garantendo una diminuzione di

almeno il 5% rispetto ai livelli del 1990, considerato come anno base. Per quanto riguarda l'Unione Europea, durante il periodo 2008-2012, gli Stati membri dell'UE si sono impegnati a ridurre complessivamente le loro emissioni di gas serra dell'8%. Gli obiettivi di ciascun Paese membro sono stati stabiliti attraverso un accordo conosciuto come "*burden sharing*", il quale ha considerato le condizioni economiche e la struttura industriale di ciascuno di essi. In base a questo accordo, sono stati definiti obiettivi nazionali specifici: alcuni Stati dovevano ridurre le emissioni, altri potevano aumentarle entro un limite prefissato, mentre altri ancora avevano l'obiettivo di mantenere le emissioni al livello del 1990.

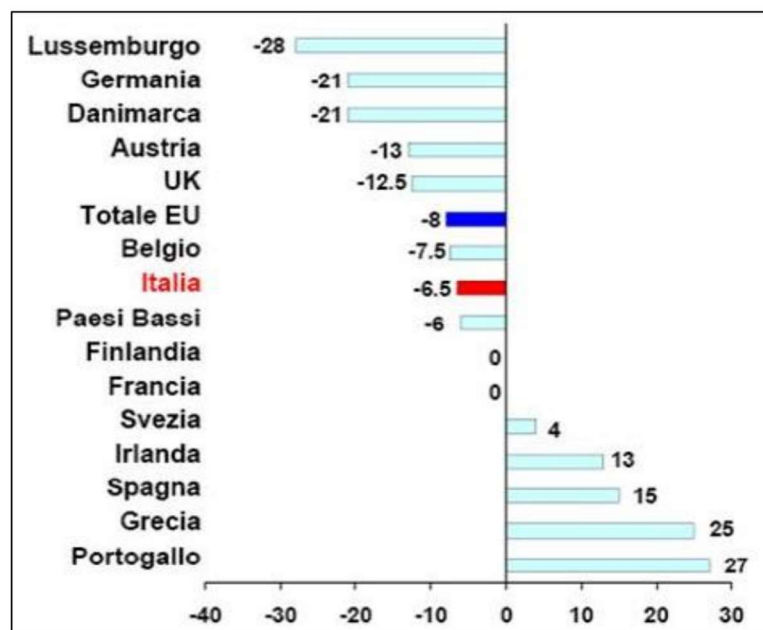


Figura 11 Obiettivo di riduzione rispetto alle emissioni del 1990 che si sarebbero dovuti raggiungere nel periodo 2008-2012 secondo il protocollo di Kyoto

Per l'Italia l'obiettivo riguardava la riduzione delle proprie emissioni del 6,5% rispetto ai livelli del 1990 ma, secondo l'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e Ricerca Ambientale), la riduzione è stata limitata al 4,5%. L'Unione Europea invece, nel suo complesso è riuscita a diminuire le emissioni di gas serra nel 2012 del 18% rispetto alle emissioni del 1990 (European Commission, n.d.; ISPRA, n.d.).

È interessante osservare che tra i Paesi che hanno scelto di non ratificare il Protocollo di Kyoto, figurano in maniera rilevante gli Stati Uniti, responsabili del 36% delle emissioni totali di anidride carbonica dell'epoca. Invece, Cina e India, che oggi sono tra i principali emettitori di gas serra, hanno ratificato il protocollo ma non sono stati soggetti a obblighi di riduzione delle emissioni, poichè erano classificati come Paesi in via di sviluppo (United Nations, 1998).

Le emissioni di gas serra causate dai voli internazionali dell'industria dell'aviazione non facevano parte degli obiettivi di riduzione del Protocollo di Kyoto. Questa esclusione era dovuta principalmente alla difficoltà nel definire in maniera chiara il Paese responsabile di queste emissioni. Tuttavia, il Protocollo di Kyoto ha creato le premesse a iniziative specifiche, tra cui l'EU ETS (*European Union Emissions Trading System*), il sistema di scambio quote delle emissioni dell'Unione Europea. Questo sistema è stato introdotto nel 2003 e ha iniziato a funzionare nel 2005, principalmente coinvolgendo le aziende con un elevato consumo di energia. Poi, dal 1° gennaio 2012, l'industria dell'aviazione è stata inclusa nel sistema attraverso la Direttiva 2008/101/CE del Parlamento Europeo. Questa direttiva si applica a tutti gli operatori, sia europei che non europei, che operano all'interno dell'Unione Europea. Nel settore dell'aviazione, questo riguarda circa 600 operatori su un totale di 4000 a livello globale. L'EU ETS rappresenta un sistema di tipo *'cap and trade'* che si applica esclusivamente alle emissioni di anidride carbonica. In questo contesto, viene stabilito un limite massimo globale alle emissioni di CO₂ ammesse all'interno del territorio europeo, a cui viene associato un numero corrispondente di quote di emissione, le quali possono essere negoziate su un mercato apposito. Nel caso dell'industria dell'aviazione, ogni operatore aereo è tenuto a compensare annualmente le proprie emissioni effettive, che vengono verificate da una terza parte indipendente, mediante l'acquisto di una quantità corrispondente di quote di emissione. Ogni operatore riceve un'allocazione iniziale di quote gratuite, ma deve acquisire ulteriori quote da imprese che dispongono di un surplus al fine di compensare le emissioni in eccesso. Il sistema mira a incentivare le imprese a ridurre le proprie emissioni di CO₂ attraverso l'adozione di tecnologie innovative a minor impatto ambientale e, allo stesso tempo, contribuisce a finanziare progetti ambientali sostenibili (European Commission, n.d.).

Nonostante il mercato ETS europeo sia il più significativo e consolidato, iniziative simili sono state introdotte a livello regionale in altre parti del mondo, tra cui la Cina (*China ETS*), il Canada (*Canada's Aviation Climate Action Plan*) e alcuni stati degli Stati Uniti (RGGI, WCI).

L'Accordo di Parigi, sottoscritto nel 2015 durante la Conferenza delle Parti (COP21), rappresenta un impegno globale di fondamentale importanza nella lotta contro il cambiamento climatico. Questo accordo si propone l'obiettivo di limitare l'aumento della temperatura media globale a un valore "ben al di sotto" dei 2°C rispetto ai livelli preindustriali, con l'ulteriore aspirazione di impegnarsi a limitare l'incremento a 1,5°C. Nel quadro dell'Accordo di Parigi, gli Stati firmatari si impegnano ad attuare misure a livello nazionale finalizzate a ridurre le emissioni di gas serra. Tuttavia, è fondamentale sottolineare che l'Accordo non specifica dettagliatamente le politiche o i meccanismi per affrontare le emissioni all'interno del settore

dell'aviazione. Invece, fornisce una cornice globale entro la quale si sono sviluppate iniziative specifiche volte a mitigare le emissioni di anidride carbonica. L'ICAO, in qualità di agenzia delle Nazioni Unite incaricata della regolamentazione dell'aviazione civile internazionale, ha svolto un ruolo di primaria importanza nell'adattare il settore dell'aviazione alle disposizioni dell'Accordo di Parigi (United Nations, 2015).

Nel 2016, l'ICAO ha introdotto il programma CORSIA (*Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*), per limitare le emissioni nette di CO₂ derivanti dalla crescita prevista del traffico aereo internazionale. CORSIA rappresenta la prima misura a livello globale per affrontare le crescenti preoccupazioni legate alle emissioni di anidride carbonica nel settore dell'aviazione. Il programma è basato su un meccanismo di compensazione di quote analogo all'ETS europeo. Il suo obiettivo principale è quello di stabilizzare le emissioni di CO₂ del settore dell'aviazione ai livelli registrati nel 2020. È importante notare che CORSIA si concentra esclusivamente sulle emissioni generate dai voli civili internazionali, poiché le emissioni dei voli nazionali rientrano nei report annuali di ciascun Paese (EASA, 2022). Nonostante sia stato adottato nel 2016, il programma CORSIA è stato implementato solo nel 2021. Il periodo 2021-2026 rappresenta una fase pilota con adesione volontaria, sebbene l'Unione Europea e i suoi membri abbiano deciso di partecipare sin dall'inizio. A partire dal 2027, la partecipazione al programma diventerà obbligatoria per tutti i Paesi, con alcune eccezioni specifiche. Si stima che già a partire dal 2027 si potranno compensare fino all'80% delle emissioni di CO₂ in eccedenza rispetto ai livelli del 2020 (ICAO, 2016; Jaramillo et al., 2022).

Un'altra iniziativa di rilievo è il progetto "*Flightpath 2050*", promosso dall'Unione Europea. *Flightpath 2050* è una strategia europea nata nel 2011 per il settore dell'aviazione, che mira a guidare lo sviluppo dell'aviazione europea fino al 2050, ponendo un forte accento sulla sostenibilità ambientale. L'obiettivo principale è raggiungere una crescita neutra in termini di emissioni di anidride carbonica entro il 2050, riducendo l'impatto ambientale dell'aviazione attraverso l'innovazione tecnologica, la gestione del traffico aereo e altre misure. Questa iniziativa è stata sviluppata con la collaborazione dell'industria dell'aviazione, dei governi e delle istituzioni europee per promuovere una crescita sostenibile nel settore. Tra i principali obiettivi ambientali di *Flightpath2050* figurano (European Commission, 2012):

- La riduzione delle emissioni di CO₂ del 75%, delle emissioni di NO_x del 90%, e la diminuzione del rumore del 65%, sulla base dei livelli di emissione del 2000 ed entro il 2050
- Il raggiungimento di zero emissioni nella fase di *taxiing* all'interno degli aeroporti

- La promozione della progettazione di aeromobili con una maggiore possibilità di riciclo e riutilizzo.
- L'incremento significativo dell'uso di carburanti per aviazione sostenibili (SAF) nell'industria dell'aviazione

Inoltre, nel contesto delle iniziative per ridurre l'impatto ambientale dell'aviazione, è stato proposto un progetto significativo anche dalla NASA: il programma N+3. Questa iniziativa mira a sviluppare tecnologie aeronautiche che potrebbero essere implementate entro il 2030-2035, con l'intento di anticipare le innovazioni che si prevede emergano in un orizzonte temporale di tre generazioni. Gli obiettivi del programma sono i seguenti: migliorare l'efficienza del carburante del 70%, ridurre le emissioni di biossido di carbonio del 75% e abbattere le emissioni di ossidi di azoto del 71%. Inoltre, nell'ambito di N+3 si stanno valutando nuove configurazioni di aerei, come modelli a fusoliera larga senza coda e aerei con propulsione ibrida-elettrica, con l'obiettivo di ridurre l'impatto sonoro (NASA, n.d.).

3.3 Efficientamento e propulsione alternativa

3.3.1 Aumento dell'efficienza

È opportuno considerare che per raggiungere gli obiettivi ambientali, oltre all'attuazione di misure politiche, si sta intervenendo anche su altri fattori: migliorie tecniche, efficientamento operativo e applicazione di propulsione alternativa.

Le prestazioni dei velivoli possono essere migliorate grazie all'efficientamento dei motori, la riduzione del peso dell'aeromobile ed il miglioramento aerodinamico (Rutherford, 2020). Dagli anni '60 fino al 2019 si è ottenuta una riduzione del consumo di carburante del 1,3% annuo (Kharina & Rutherford, 2015); tuttavia, ci si aspetta che il tasso di ottimizzazione tenda a diminuire, a meno che non vengano scoperti materiali innovativi o vengano adottate forme di velivoli radicalmente diverse (IPCC, 2022).

Per quanto riguarda l'efficienza operativa, l'ICAO stima che le inefficienze sulle rotte aeree a livello globale si aggirino attorno al 2-6%. Infatti, la maggior parte dei voli aerei adotta già le rotte più ottimali, nei casi possibili (ICAO, 2019; Jaramillo, 2022).

Sebbene vi sia stato un miglioramento nel grado di riempimento dei voli, c'è ancora ampio margine per ulteriori progressi. Infatti, nonostante il PLF (*Passenger Load Factor*) abbia mostrato una tendenza crescente, toccando un picco dell'82.4% nel 2019, ha subito un drastico

calo a causa delle restrizioni imposte dalla pandemia COVID-19, registrando il 65,2% nel 2020 e il 67,7% nel 2021 (Airlines for America, 2023).

3.3.2 Sustainable Aviation Fuels

Una delle principali strategie adottate per ridurre le emissioni nel settore dell'aviazione è l'impiego dei SAF (*Sustainable Aviation Fuels*). Poiché non esiste una definizione concordata a livello internazionale per i carburanti per l'aviazione sostenibile, di seguito si farà riferimento a quella dell'ICAO: “carburanti derivanti da fonti alternative al petrolio che soddisfino determinati criteri di sostenibilità”, i quali vengono definiti nell'ambito dell'iniziativa CORSIA.

Questi carburanti possono essere ottenuti da una vasta gamma di fonti rinnovabili, comprese piante, oli da cucina, zuccheri, rifiuti agricoli o legname, gas di scarico delle centrali elettriche e rifiuti solidi urbani (EBAA, 2020; Jaramillo et al., 2022). Quando le materie prime sono di origine biologica, come nel caso di grassi animali, piante e oli vegetali vengono definiti biocarburanti, anche comunemente noti come *biojet* (Lim et al., 2023).

Un passo significativo verso la loro adozione come carburanti per l'aviazione è stato compiuto nel 2008 con la formazione del *Sustainable Aviation Fuel User Group* (SAFUG), un'entità dedicata a promuovere la ricerca, lo sviluppo e l'uso dei SAF. Nello stesso anno, Virgin Atlantic ha realizzato il primo volo di prova da Londra ad Amsterdam, alimentando l'aereo con una miscela di carburante tradizionale e biocarburante. Quest'ultimo, derivato da olio di cocco e albero di babassu, rappresentava il 20% del volume totale del carburante utilizzato (IATA, 2015). Da allora, i biocarburanti per l'aviazione hanno ottenuto l'approvazione per l'uso commerciale. Tuttavia, per poter essere utilizzati è necessario che rispettino rigorosi standard di sicurezza stabiliti dall'ASTM International (Jaramillo et al., 2022). L'ASTM D7566 è uno degli standard principali che stabilisce i criteri per la produzione dei SAF. Attualmente, questo standard prevede sette metodi di produzione di carburanti alternativi per l'aviazione, e tali metodi implicano la miscelazione di SAF con carburante avio tradizionale. Inoltre, per essere approvati come carburanti per aerei, i SAF devono rispettare rigorosi standard di qualità e presentare caratteristiche simili ai carburanti per aerei tradizionali. A tale scopo, l'ASTM D1655 è lo standard internazionale più diffuso e definisce i requisiti per i carburanti al cherosene convenzionali.

Attualmente, i SAF rappresentano una tra le soluzioni più immediate e promettenti per ridurre le emissioni nel settore aeronautico, per via della loro facilità di implementazione. Infatti, sono pensati per essere combustibili drop-in, cioè, possono essere utilizzati in sostituzione al

kerosene senza necessità di modifiche ai motori o alle infrastrutture aeroportuali (Cabrera & Melo de Sousa, 2022; EASA, 2022). Un vantaggio fondamentale dei SAF è la loro capacità di ridurre le emissioni di gas serra. A differenza dei combustibili fossili, che liberano carbonio precedentemente immagazzinato nel sottosuolo, i SAF reintegrano il carbonio già esistente nel ciclo naturale, attenuando l'impatto sul cambiamento climatico. Questi biocarburanti possono ridurre le emissioni di carbonio lungo tutto il loro ciclo di vita fino al 70%. Inoltre, contribuiscono a diminuire le emissioni di altri inquinanti, come fuliggine, ossidi di zolfo, particelle ultrafini e ossidi di azoto (NO_x) (Jaramillo et al., 2022).

La diffusione dei biocarburanti SAF è influenzata da vari fattori, tra cui politiche, disponibilità di materie prime e costi. Infatti, è essenziale che la produzione dei SAF sia sostenibile in tutte le fasi, dalla coltivazione alla raffinazione e al trasporto. (Cabrera & Melo de Sousa, 2022).

Per quanto riguarda le politiche, la loro promozione a livello internazionale e nazionale è essenziale per favorire una transizione verso un'industria aeronautica più sostenibile. Sebbene le politiche specifiche per i biocarburanti aeronautici siano ancora limitate, alcune nazioni hanno introdotto misure di incentivazione, come la Norvegia con tariffe di atterraggio ridotte e l'Indonesia con l'obbligo di un uso minimo del 2% di carburante alternativo. In altri paesi, come Stati Uniti e Australia, le politiche sul carbonio hanno rappresentato il principale incentivo all'uso del *biojet* (Lim et al., 2023).

Per quanto riguarda le materie prime, esistono preoccupazioni legate alla loro disponibilità e sostenibilità. Tuttavia, studi condotti dall'IPCC hanno dimostrato che esiste abbastanza terreno per supportare lo sviluppo su larga scala della bioenergia globale, compresa la produzione di biocarburanti. L'ICAO ha inoltre evidenziato la compatibilità tra la produzione commerciale di biocarburanti e quella di alimenti e altri bioprodotto (Lim et al., 2023).

Un ostacolo significativo alla domanda di SAF è rappresentato dal costo. Infatti, secondo un'analisi dell'*International Council on Clean Transport*, il loro prezzo può variare da due a otto volte rispetto a quello del carburante aeronautico convenzionale. Tale differenza è dovuta dalla complessità dei processi produttivi e dall'elevato costo delle materie prime (Kharina & Rutherford, 2015).

Nonostante queste difficoltà, le attuali misure politiche, come l'EU ETS, non sembrano fornire incentivi sufficienti per stimolare la domanda. Tali circostanze hanno portato a una limitata adozione dei SAF: infatti, nel 2021, rappresentavano solamente lo 0,1% del carburante utilizzato nel settore aeronautico globale (Soone, 2020). Proiezioni dello scenario

di sviluppo sostenibile dell'IEA indicano che, entro il 2030, i SAF potrebbero soddisfare circa il 10% della domanda globale di carburante per l'aviazione, salendo al 19% entro il 2040 (IEA, 2019).

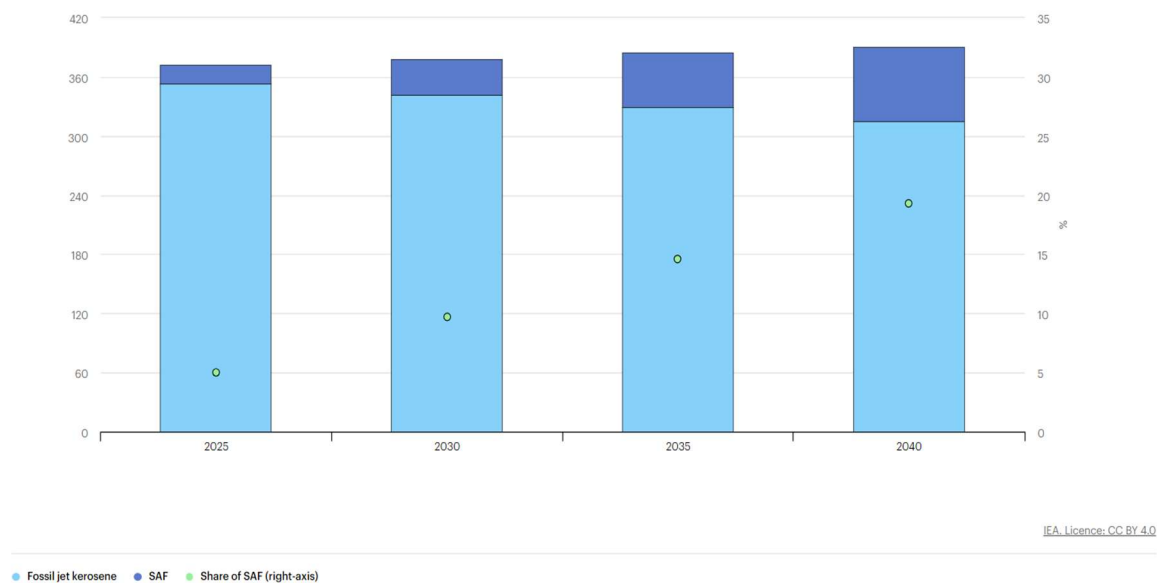


Figura 12 Previsioni di consumo di SAF nel *Sustainable Development Scenario* (SDS), 2025-2040 (IEA, 2019).

Secondo le stime dell'IATA, i SAF potrebbero contribuire per circa il 65% al raggiungimento delle emissioni nette di carbonio pari a zero entro il 2050. Questa prospettiva è sostenuta dalla crescita nella produzione di SAF: nel 2022, è stata registrata una produzione mondiale di 300 milioni di litri, mostrando un incremento del 200% rispetto ai 100 milioni di litri del 2021. L'aumento nella produzione si riflette anche nell'uso operativo, con oltre 490.000 voli commerciali alimentati da SAF fino ad aprile 2023. Inoltre, dall'inizio del 2022, sono stati stipulati 57 nuovi accordi di prelievo tra compagnie aeree e produttori, segnalando un interesse crescente nel settore (IATA, 2023).

3.3.3 Aviazione elettrica

Un'altra possibile alternativa al cherosene per aumentare la sostenibilità nel settore aeronautico è l'aviazione elettrica. Nell'ambito dell'aviazione elettrica, emergono diverse architetture di propulsione, ciascuna con le proprie caratteristiche (IPCC, 2022):

1. **Aerei turboelettrici:** questa configurazione utilizza turbine a gas (alimentate da idrocarburi o idrogeno) per produrre energia elettrica attraverso un generatore. L'energia prodotta alimenta un motore elettrico, il quale fornisce spinta a un'elica e non sono presenti batterie per l'accumulo energetico. Sebbene ci sia un risparmio in termini di consumo di carburante, dato dall'efficienza del motore elettrico rispetto ad un motore a combustione

interna, le emissioni di inquinanti e il rumore restano significativi (Adu-Gyamfi & Good, 2022).

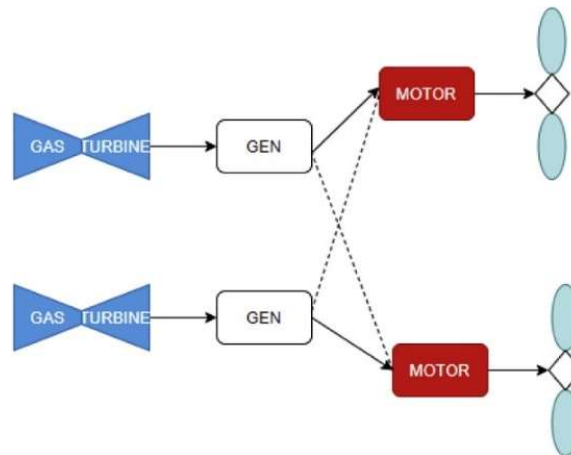


Figura 13 Aereo turboelettrico (Adu-Gyamfi & Good, 2022).

2. Aerei ibridi-elettrici: in questa configurazione la batteria elettrica e le turbine a gas operano in modo indipendente. In base alle diverse fasi del volo, viene regolato l'apporto energetico di ciascuna fonte alla spinta del motore. La gestione ottimale delle diverse risorse energetiche permette una notevole riduzione del consumo di carburante e delle emissioni. Secondo diversi studi però, i sistemi a propulsione ibrida possono essere applicati efficientemente solo per voli di breve durata e non per i viaggi convenzionali di lunga durata (Adu-Gyamfi & Good, 2022).

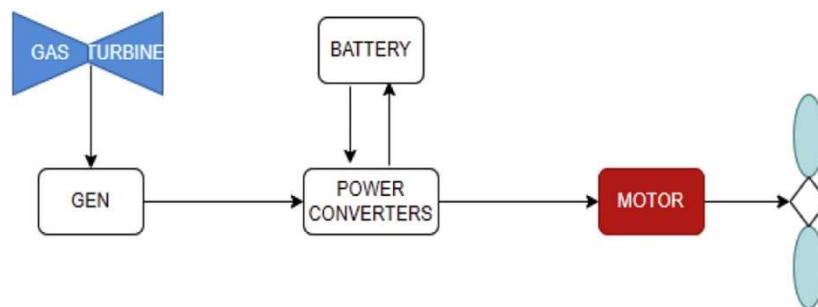


Figura 14 Aereo ibrido elettrico: configurazione in serie (Adu-Gyamfi & Good, 2022).

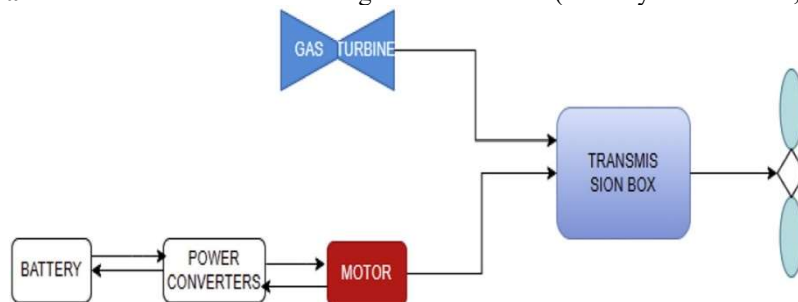


Figura 15 Aereo ibrido elettrico: configurazione in parallelo (Adu-Gyamfi & Good, 2022).

3. Aerei completamente elettrici: in questa configurazione, l'energia viene fornita da una batteria ricaricabile che alimenta direttamente un motore elettrico e, di conseguenza, un'elica. A differenza delle configurazioni ibride, non è possibile ricaricare le batterie durante il volo, rendendo necessaria una ricarica a terra tra un viaggio e l'altro (Adu-Gyamfi & Good, 2022).

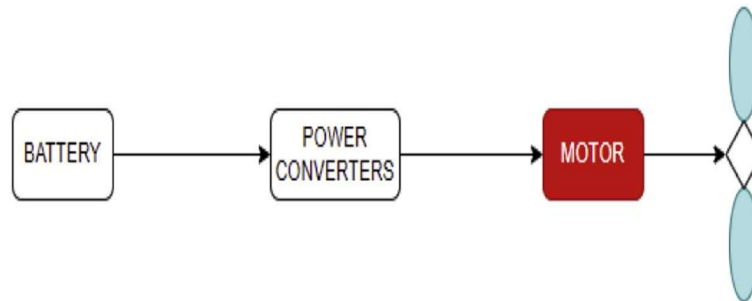


Figura 16 aereo completamente elettrico (Adu-Gyamfi & Good, 2022).

L'adozione di aerei completamente elettrici offrirebbe numerosi benefici, come l'eliminazione delle emissioni di gas serra durante il volo, una minore rumorosità e una riduzione dei costi operativi. Tuttavia, la tecnologia attuale delle batterie non ha ancora raggiunto una maturità sufficiente per garantire la stessa autonomia di volo degli aerei alimentati con cherosene (IPCC, 2022).

Le moderne batterie agli ioni di litio presentano una densità energetica di circa 250 Wh/kg, il che rappresenta un rapporto di circa 1:48 rispetto alla densità energetica del carburante tradizionale, che si attesta intorno a 12.000 Wh/kg. Ciò significa che, con le tecnologie attuali, il peso delle batterie necessario per alimentare un aereo come l'Airbus A320 supererebbe di 38 volte il peso massimo consentito per il carico dell'aeromobile (Adu-Gyamfi & Good, 2022). Epstein e O'Flarity (2019) hanno stimato che, a causa del peso eccessivo, il 92% della flotta aerea mondiale non potrebbe volare utilizzando l'attuale tecnologia delle batterie. Tuttavia, è fuorviante basarsi esclusivamente sulla densità energetica per confrontare gli aerei convenzionali con quelli a propulsione elettrica. Infatti, se si tiene conto dell'efficienza superiore del motore elettrico rispetto al motore a combustione e delle potenziali migliorie aereodinamiche, batterie con una densità energetica di 600 Wh/kg potrebbero ridurre il rapporto energetico con il carburante per aerei a 1:1.5. Questo obiettivo potrebbe essere raggiunto grazie ai progressi tecnologici previsti nel prossimo (Adu-Gyamfi & Good, 2022).

Altri miglioramenti tecnologici necessari per l'implementazione dell'aviazione elettrica riguardano la sicurezza delle batterie, in quanto verrebbero sottoposte a continue sollecitazioni termiche e meccaniche, e la loro velocità di ricarica. A tal proposito, operare con batterie parzialmente cariche potrebbe comportare una perdita di efficienza, riducendo

significativamente l'autonomia. D'altra parte, caricare completamente le batterie richiederebbe tempi prolungati, riducendo così l'efficienza operativa degli aerei. Per ovviare a questi problemi, si sta valutando l'adozione di batterie intercambiabili, che permetterebbero una sostituzione rapida a terra, ottimizzando i tempi di volo e minimizzando le attese (Hospodka et al., 2020).

È importante sottolineare che, nonostante l'aviazione elettrica a batteria non comporti emissioni durante il volo, il processo di produzione e riciclaggio delle batterie non è completamente privo di emissioni. Inoltre, il processo di produzione dell'energia necessaria per ricaricare le batterie dovrebbe anch'esso essere preso in considerazione (Blömeke et al., 2022; IPCC, 2022).

3.3.4 Idrogeno

L'uso dell'idrogeno emerge come una soluzione promettente per rispondere alle sfide ambientali e di sostenibilità che il settore aeronautico deve affrontare. Storicamente, l'idrogeno ha trovato il suo primo impiego nell'aviazione nel tardo XVIII secolo, utilizzato nei palloni aerostatici grazie alla sua densità inferiore rispetto all'aria. Nei primi anni del XX secolo, la sua applicazione si estese ai dirigibili rigidi, come gli Zeppelin. Intorno al 1956, negli Stati Uniti, furono condotti i primi esperimenti sull'uso dell'idrogeno come combustibile per aerei. In uno di questi esperimenti, un bombardiere B57 Canberra fu fatto volare utilizzando idrogeno pressurizzato con elio come combustibile in uno dei suoi motori (Arat & Sürer, 2017). Nel 1989, l'Unione Sovietica sviluppò sperimentalmente l'aereo civile Tupolev 155 (Tu-155) che aveva un motore alimentato interamente ad idrogeno liquido. Questo motore fu testato con successo raggiungendo altitudini fino ai 7000 metri e velocità di 900 km/h. Tuttavia, nonostante i risultati promettenti, il Tu-155 fu riconvertito a GNL dopo pochi voli a causa degli alti costi operativi dell'idrogeno e della mancanza di infrastrutture per lo stoccaggio (Arat & Sürer, 2017; ICAO, 2019).

Oggi, l'immagazzinamento dell'idrogeno può avvenire principalmente in due forme: compressa o criogenica. Nell'immagazzinamento compresso, l'idrogeno viene mantenuto allo stato gassoso a pressioni che variano tra 35 MPa e 70 MPa. Questo metodo offre un rapido rilascio del gas, ma necessita di pressioni molto elevate per lo stoccaggio. Tuttavia, la densità volumetrica dell'idrogeno in stato gassoso non aumenta proporzionalmente all'aumentare della pressione, richiedendo eccessivi volumi di stoccaggio a parità di energia necessaria per il volo. Per l'aviazione quindi, si tende a privilegiare l'immagazzinamento di idrogeno in forma criogenica che richiede, invece, basse pressioni operative e temperature estremamente

basse. L'idrogeno, mantenuto intorno ai -260°C , si presenta allo stato liquido, con una densità notevolmente maggiore rispetto allo stato gassoso, riducendo così il volume dei serbatoi, necessario per lo stoccaggio. Tuttavia, la necessità di mantenere l'idrogeno liquido a temperature così basse, implica l'uso di serbatoi criogenici ben isolati termicamente e capaci di resistere ad eventuali variazioni di pressione, sia per gli aerei che per le infrastrutture aeroportuali e i veicoli di trasporto (Arat & Sürer, 2017; Yusaf et al., 2022).

Nel settore aeronautico, l'impiego moderno dell'idrogeno si articola principalmente in due approcci distinti: come sostituto del cherosene, in particolare per aerei di grandi dimensioni o in celle a combustibile per aeromobili di dimensioni ridotte (Baroutaji et al., 2019).

Per quanto riguarda il primo approccio, l'adozione dell'idrogeno al posto dei carburanti fossili permette una notevole riduzione delle emissioni di gas serra. Durante la combustione, l'idrogeno produce principalmente vapore acqueo (H_2O) e una minima quantità di NO_x (trascurabili rispetto alla combustione del cherosene), eliminando completamente le emissioni di CO_2 , fuliggine e ossidi di zolfo. Questo costituisce un significativo progresso verso la riduzione dell'impatto ambientale dell'aviazione commerciale (Arat & Sürer, 2017; Jaramillo et al., 2022).

Inoltre, sebbene l'idrogeno liquido possa teoricamente alimentare motori progettati per carburanti fossili, le specifiche esigenze di stoccaggio rendono necessaria la progettazione di aerei dedicati. La riprogettazione degli aerei non è solo una risposta alle esigenze di temperatura e resistenza dei serbatoi, ma è anche guidata da considerazioni energetiche (Yusaf et al., 2022).

Infatti, nonostante l'idrogeno liquido abbia una densità energetica per unità di massa pari a tre volte quella del cherosene, la sua densità energetica per unità di volume è circa quattro volte inferiore. Questo implica che, a parità di energia necessaria per il volo, gli aerei alimentati ad idrogeno siano più efficienti in termini di peso, ma necessitino di serbatoi di dimensioni maggiori. (Baroutaji et al., 2019).

Inoltre, per garantire un'adeguata isolamento termica dei serbatoi, questi devono essere posizionati all'interno della fusoliera, anziché nelle ali come avviene per i serbatoi di cherosene. Questo comporta la progettazione di aerei con fusoliere più ampie, richiedendo una particolare attenzione alla distribuzione dei pesi e al baricentro dell'aereo (Arat & Sürer, 2017; Baroutaji et al., 2019).

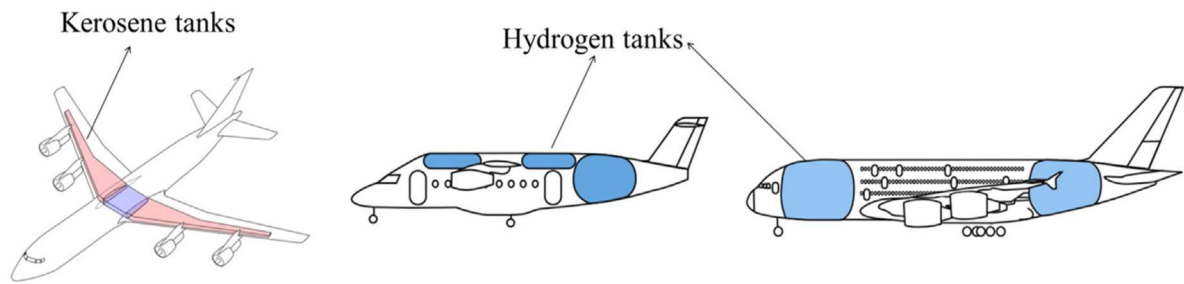


Figura 17 Posizione dei serbatoi di cherosene ed idrogeno (Baroutaji et al., 2019)

L'altro impiego fondamentale dell'idrogeno riguarda le celle a combustibile. Le celle a combustibile sono dispositivi che convertono l'energia chimica di un combustibile in elettricità attraverso reazioni elettrochimiche. Sebbene funzionino in modo simile alle batterie tradizionali, non necessitano di essere ricaricate da una fonte esterna, ma sfruttano direttamente l'energia del combustibile fornito. Tra i vari combustibili utilizzabili per le celle, l'idrogeno si distingue per le sue potenzialità in termini di sostenibilità. All'interno delle celle, l'idrogeno, utilizzabile sia in forma liquida che gassosa, reagisce con l'ossigeno O_2 producendo elettricità e rilasciando come unico sottoprodotto l'acqua. Questo processo garantisce emissioni nulle di ossidi di azoto (NO_x), oltre a vantare un'alta efficienza, un funzionamento silenzioso e minime vibrazioni (Baroutaji et al., 2019). Un altro vantaggio delle celle a combustibile ad idrogeno è la loro elevata densità energetica, che può raggiungere valori fino a 800 Wh/kg, superiori ai 250 Wh/kg delle moderne batterie al litio. Tuttavia, presentano una bassa potenza specifica (W/kg), inferiore rispetto ai motori a combustione tradizionali e per questo motivo, allo stato dell'arte, possono essere utilizzate come fonte di energia principale per la propulsione solo per gli aeromobili più piccoli (Arat & Sürer, 2017; Baroutaji et al., 2019).

Attualmente, le principali applicazioni nell'ambito aeronautico riguardano l'alimentazione delle Unità di Potenza Ausiliaria (APU), responsabile di circa il 20% delle emissioni totali degli aeromobili, ma anche dei sistemi elettrici a bordo e delle attrezzature di supporto a terra (GSE), che non richiedono elevate potenze (Baroutaji et al., 2019). Grandi produttori aeronautici, come Airbus (2020) e Boeing (2022), stanno studiando la possibilità di progettare aeromobili commerciali che utilizzano motori ad idrogeno per la propulsione e celle a combustibile a idrogeno per alimentare tutti i sistemi non direttamente legati alla propulsione. Ad esempio, Airbus, attraverso il progetto 'ZEROe', mira a mettere in servizio aerei a idrogeno capaci di trasportare tra i 100 e i 200 passeggeri entro il 2035 (Airbus reveals new zero-emission concept aircraft, 2020).

Pur garantendo una significativa riduzione delle emissioni in volo, è fondamentale considerare le emissioni generate dalla produzione stessa dell'idrogeno. Al momento, circa il 90% della domanda globale di idrogeno è soddisfatta dall'idrogeno 'grigio', prodotto da fonti fossili come il gas naturale e il carbone. Questo processo emette CO₂ e CO, rendendo l'idrogeno poco più sostenibile rispetto all'uso diretto di questi combustibili. Minori emissioni, seppur non nulle, vengono rilasciate per la produzione di idrogeno 'blu', derivante dalla cattura e stoccaggio di CO₂. L'idrogeno 'verde', ottenuto attraverso l'elettrolisi dell'acqua alimentata da fonti rinnovabili, è l'unico metodo a emissioni zero (Baroutaji et al., 2019; Yusaf et al., 2022). Nonostante l'idrogeno 'grigio' abbia degli impatti ambientali notevoli, presenta la tipologia di idrogeno più prodotto a causa del suo costo inferiore e della sua storica diffusione nell'industria.

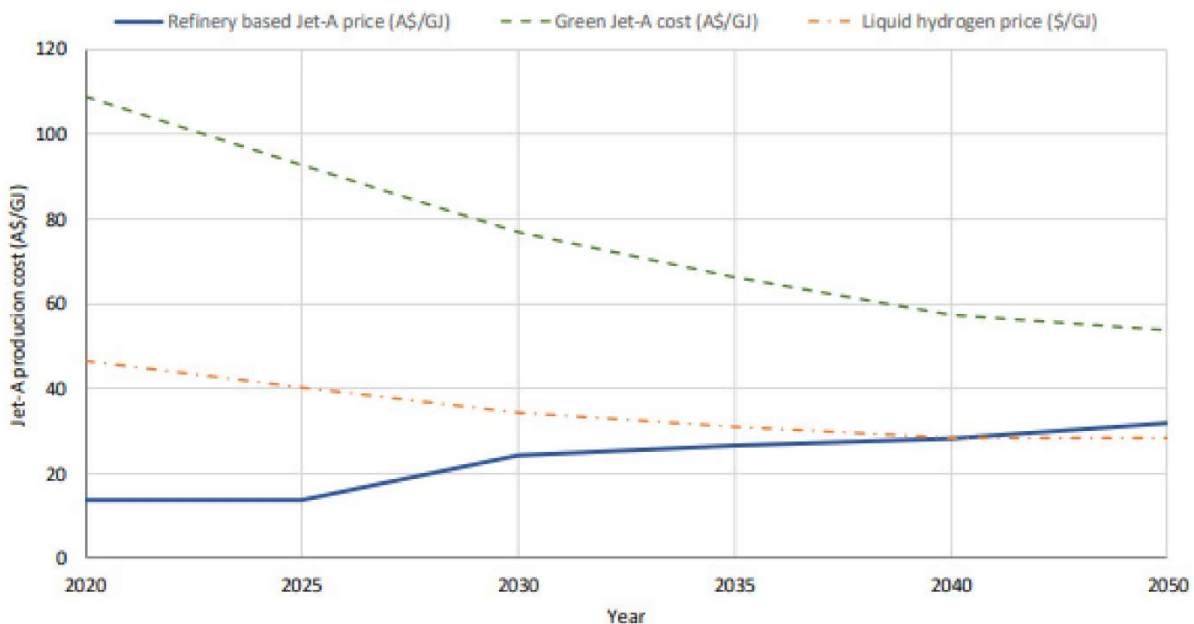


Figura 18 Proiezione dei prezzi del carburante Jet-A ed idrogeno liquido (Yusaf et al., 2022).

Oggi, la mancanza di infrastrutture e i costi elevati di produzione dell'idrogeno, rappresentano ostacoli significativi all'adozione su larga scala degli aeromobili ad idrogeno. Inoltre, l'adozione dell'idrogeno come combustibile per gli aeromobili presenta sfide economiche. I costi iniziali e operativi delle tecnologie di produzione dell'idrogeno sono considerevoli, e le stime suggeriscono che siano necessari ingenti investimenti per rendere l'idrogeno competitivo rispetto al gas naturale (Yusaf et al., 2022). Tuttavia, secondo stime dell'ICIS, in futuro l'idrogeno verde potrebbe diventare più economico dei combustibili fossili, segnando un potenziale punto di svolta nel settore (Simpson, 2022).

3.4 Proiezioni future

Uno studio di V. Grewe et al. (2021) mostra che, sebbene gli obiettivi di emissione per l'aviazione siano conformi agli obiettivi generali dell'Accordo di Parigi, è molto probabile che l'impatto climatico del trasporto aereo non riesca effettivamente raggiungere tali traguardi. Lo studio ha esaminato cinque scenari che prevedono l'attuazione di misure tecniche o politiche e attraverso un'analisi prospettica fino al 2100, ne è stata valutata l'idoneità nel rispettare l'obiettivo climatico.

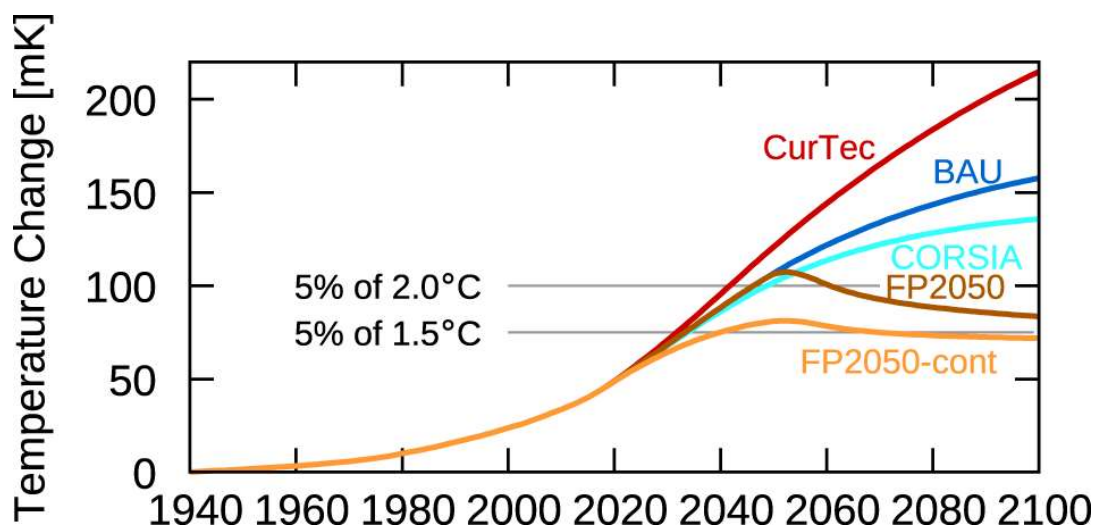


Figura 19 Variazione della temperatura della superficie terrestre secondo cinque scenari, includendo gli effetti del CO₂ e gli effetti non-CO₂ (Grewe et al., 2021)

Di seguito si propone la descrizione degli scenari e il loro contributo al raggiungimento dell'obiettivo climatico:

- CurTec: questo scenario rappresenta un futuro in cui la tecnologia attuale viene utilizzata senza miglioramenti. Si osserva un aumento della temperatura nel tempo, principalmente a causa dell'aumento previsto del volume di trasporto.
- BAU: nel BAU (*Business As Usual*), si prevedono miglioramenti tecnologici usuali che portano a un aumento dell'efficienza. Questo scenario mostra una riduzione significativa della temperatura entro il 2100, del 25% rispetto lo scenario precedente.
- CORSIA: CORSIA rappresenta uno schema di compensazione proposto dall'ICAO. Questo scenario prevede una notevole riduzione delle emissioni effettive di CO₂ e cambiamenti nelle proprietà delle scie di condensazione dovuti all'uso esteso di carburanti sostenibili (SAF) e mezzi di propulsione alternativi. Mostra una riduzione della temperatura compresa tra il 35% e il 40% rispetto allo scenario CurTec, ma, con una probabilità del 90%, è previsto un superamento del limite climatico tra il 2025 e il 2064.

- FP2050 e FP2050-cont: si tratta di due implementazioni degli obiettivi *Flightpath 2050* che differiscono nella velocità di attuazione dei miglioramenti tecnologici. Entrambi gli scenari indicano una stabilizzazione dell'impatto climatico, sebbene prevedano un temporaneo superamento intorno al 2050. Considerando che si attribuisce al settore dell'aviazione il 5% dell'aumento della temperatura antropogenica, entrambi gli scenari sembrano allineati con l'obiettivo di 2°C, e lo scenario FP2050-cont addirittura con l'obiettivo di 1,5°C. Tuttavia, l'inerzia del sistema climatico ritarda il raggiungimento di questi obiettivi.

È importante notare che in tutti i casi gli effetti non-CO₂ (che attualmente non sono inclusi nell'obiettivo dell'ICAO e vengono affrontati solo parzialmente in *Flightpath 2050*) contribuiranno all'impatto climatico del trasporto aereo (Grewe et al., 2021).

Nel marzo 2022, l'ICAO ha pubblicato un rapporto di valutazione, denominato LTAG (*Long Term global Aspirational Goal*), riguardo la fattibilità di un obiettivo a lungo termine volto alla riduzione delle emissioni di CO₂ derivanti dai voli internazionali. Lo studio ha preso in considerazione una vasta gamma di impatti, compresi quelli legati alla crescita dell'industria dell'aviazione, i costi associati all'implementazione di nuove tecnologie e le possibili innovazioni nel settore. Nella relazione sono stati delineati tre scenari integrati (IS1, IS2, IS3), ognuno caratterizzato da un diverso grado di ambizione, e successivamente sono stati confrontati con uno scenario base denominato IS0. Quest'ultimo rappresenta l'evoluzione delle emissioni basata sulla tecnologia aerea del 2018, senza ulteriori miglioramenti in termini di efficienza dei carburanti o logistica (ICAO, 2022).

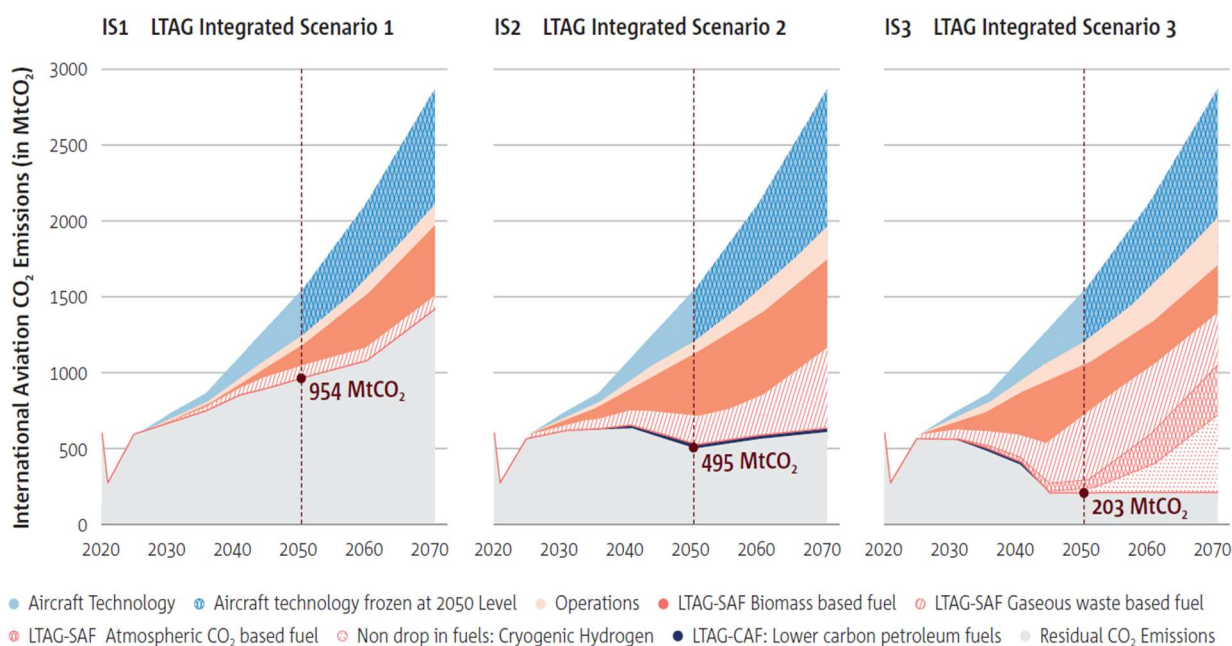


Figura 20 LTAG, scenario IS1 (a sinistra), IS2 (al centro) e IS3 (a destra). (ICAO,2022)

Scenario IS1 (*Integrated Scenario 1*): in questo scenario, si pone l'attenzione su un alto grado di raggiungibilità delle soluzioni, ma con un obiettivo di bassa aspirazione. Ciò riflette le attuali aspettative riguardo alle future tecnologie disponibili, all'efficienza operativa e alla disponibilità di carburanti alternativi e senza la necessità di apportare cambiamenti sostanziali nelle infrastrutture. Secondo le proiezioni, fino al 2050, l'efficienza globale del carburante (misurata in carburante per RTK) potrebbe registrare un incremento annuo compreso tra l'1,20% e l'1,31%, risultando significativamente al di sotto dell'obiettivo globale ICAO di efficienza del carburante del 2%. Inoltre, le emissioni di CO₂ supereranno i livelli pre-COVID del 2019, prevedendo che raggiungeranno circa 950 Mt di CO₂ nel 2050 (un aumento del 60% rispetto al 2019) e 1420 Mt di CO₂ nel 2070 (un aumento del 130%). Dunque, entro il 2050, si avrebbe una riduzione delle emissioni del 39% rispetto allo scenario IS0 ed entro il 2070 del 51%.

Scenario IS2 (*Integrated Scenario 2*): questo scenario presenta una combinazione di raggiungibilità e aspirazione di livello medio. Si ipotizza la possibilità di alcuni cambiamenti infrastrutturali, un maggiore utilizzo di carburanti alternativi e una rapida diffusione delle tecnologie future, resa possibile dalle politiche di supporto tecnologico più ampie. In questa situazione, entro il 2050, ci si aspetta che l'efficienza globale del carburante, misurata in carburante per RTK, registri un miglioramento compreso tra l'1,35% e l'1,47% annuo. Le previsioni indicano anche che le emissioni dovrebbero raggiungere circa 500 Mt di CO₂ nel 2050 (una riduzione del 20% rispetto al 2019) e si stabilizzeranno ai livelli del 2019 entro il 2070. Rispetto allo scenario IS0, è prevista una riduzione delle emissioni del 68% entro il 2050 e del 78% entro il 2070.

Scenario IS3 (*Integrated Scenario 3*): questo scenario rappresenta l'opzione più ambiziosa, caratterizzata da una bassa raggiungibilità e un'alta aspirazione. Presuppone il massimo grado di progresso tecnologico sostenuto da un forte sostegno politico, un cambiamento sistemico significativo e un allineamento internazionale. Comprende alti livelli di efficienza operativa e un'ampia adozione di carburanti alternativi. Tuttavia, è importante notare che in questo scenario, estremamente impegnativo, non si arriverà a soddisfare l'obiettivo ICAO globale di efficienza del carburante del 2%. Infatti, fino al 2050, le previsioni suggeriscono che l'efficienza energetica globale del carburante, misurata in MJ/RTK, potrebbe migliorare annualmente dall'1,55% all'1,67%. Inoltre, si prevede che le emissioni residue di CO₂ raggiungeranno le 200 Mt di CO₂ nel 2050 (una riduzione del 67% rispetto al 2019) e aumenteranno fino a 210 Mt di CO₂ nel 2070. Rispetto allo scenario IS0, ci si aspetta una notevole riduzione delle emissioni, pari all'87% entro il 2050 e al 92,5% entro il 2070.

Gli scenari delineati si basano su previsioni di traffico di intensità media, con una valutazione anche degli impatti potenziali basata su previsioni di traffico più elevate o più basse.

È importante sottolineare che, nonostante lo scenario IS3 sia caratterizzato dalla massima ambizione e da una notevole riduzione delle emissioni, la sua attuazione risulta ad oggi poco probabile, e comunque comporterebbe emissioni residue superiori all'obiettivo ambientale stabilito. Parallelamente, questo studio mette in luce un'analisi approfondita dei costi e degli investimenti connessi a questa sfida complessa, coinvolgendo vari attori chiave, tra cui governi, produttori di aeromobili, fornitori di carburante e gestori aeroportuali. Nel contesto dello scenario meno ambizioso (IS1), i governi dovrebbero stanziare una cifra compresa tra 15 e 180 miliardi di dollari entro il 2050 per sostenere lo sviluppo delle tecnologie aeree. Allo stesso tempo, gli aeroporti potrebbero necessitare di investimenti tra i 2 e i 6 miliardi di dollari. I produttori di aeromobili dovrebbero, invece, prevedere investimenti significativi, pari a circa 180 miliardi di dollari, tra il 2020 e il 2050, per sviluppare aeromobili sempre più efficienti dal punto di vista del consumo di carburante. Inoltre, l'implementazione su vasta scala di carburanti alternativi richiederebbe un impegno finanziario di notevole entità, stimato in circa 1.300 miliardi di dollari entro il 2050.

4 Conclusioni

Il settore dell'aviazione è una fonte significativa di emissioni di gas serra e, con la crescente domanda di viaggi aerei, è essenziale affrontare le sfide ambientali associate. È stato analizzato l'impatto ambientale delle emissioni dell'aviazione, studiando le diverse fasi operative di un volo e le relative emissioni. Inoltre, sono state esplorate le strategie per una transizione sostenibile, inclusi i miglioramenti tecnologici, l'utilizzo di mezzi di propulsione e le politiche di regolamentazione.

La ricerca ha evidenziato che, sebbene siano in fase di attuazione significative innovazioni tecnologiche e siano state adottate politiche per ridurre le emissioni, è necessario un impegno maggiore per garantire che il settore dell'aviazione contribuisca in modo significativo alla lotta contro il cambiamento climatico. Gli scenari futuri mostrano che, con l'adozione di tecnologie avanzate e un forte sostegno politico, è possibile raggiungere riduzioni significative delle emissioni nel settore dell'aviazione.

Bibliografia

- Adu-Gyamfi, B. A., & Good, C. (2022). Electric aviation: A review of concepts and enabling technologies. In *Transportation Engineering* (Vol. 9).
<https://doi.org/10.1016/j.treng.2022.100134>
- Airbus reveals new zero-emission concept aircraft.* (2020).
<https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2020-09-airbus-reveals-new-zero-emission-concept-aircraft>
- Airlines For America. (2023). *World Airlines Traffic and Capacity*.
<https://www.airlines.org/dataset/world-airlines-traffic-and-capacity/>
- Arat, H. T., & Sürer, M. G. (2017). State of art of hydrogen usage as a fuel on aviation. *European Mechanical Science*, 2(1). <https://doi.org/10.26701/ems.364286>
- ASTM International. (n.d.-a). *Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons D7566*. Retrieved September 3, 2023, from <https://www.astm.org/d7566-22a.html>
- ASTM International. (n.d.-b). *Standard Specification for Aviation Turbine Fuels D1655*. Retrieved September 3, 2023, from <https://www.astm.org/d1655-21.html>
- Baroutaji, A., Wilberforce, T., Ramadan, M., & Olabi, A. G. (2019). Comprehensive investigation on hydrogen and fuel cell technology in the aviation and aerospace sectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 106.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.022>
- Blömeke, S., Scheller, C., Cerdas, F., Thies, C., Hachenberger, R., Gonter, M., Herrmann, C., & Spengler, T. S. (2022). Material and energy flow analysis for environmental and economic impact assessment of industrial recycling routes for lithium-ion traction batteries. *Journal of Cleaner Production*, 377.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134344>
- Boeing Unveils Hydrogen And Electric Concepts That Could Power The Future Of Flight.* (2022). <https://fuelcellsworks.com/news/boeing-unveils-hydrogen-and-electric-concepts-that-could-power-the-future-of-flight/>
- Cabrera, E., & Melo de Sousa, J. M. (2022). Use of Sustainable Fuels in Aviation—A Review. In *Energies*. <https://doi.org/10.3390/en15072440>
- Canada's Aviation Climate Action Plan.* (2022). <https://tc.canada.ca/en/corporate-services/policies/canada-s-aviation-climate-action-plan>
- EASA. (2022). *European Aviation Environmental Report 2022*. European Union Aviation Safety Agency. <https://www.easa.europa.eu/eco/eaer>
- EBAA. (2020). *Fueling the Future - a guide on Sustainable Aviation Fuel*. European Business Aviation Association. <https://www.ebaa.org/resources/fueling-the-future-a-guide-on-sustainable-aviation-fuel/>

- EEA. (2020). *Transport and environment report 2020 - Train or plane?* European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/publications/transport-and-environment-report-2020>
- Epstein, A. H., & O'Flarity, S. M. (2019). Considerations for reducing aviation's CO₂ with aircraft electric propulsion. *Journal of Propulsion and Power*, 35(3). <https://doi.org/10.2514/1.B37015>
- European Commission. (n.d.-a). *EU Emissions Trading System (EU ETS)*. Retrieved August 30, 2023, from https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets_en
- European Commission. (n.d.-b). *Kyoto, 1st commitment period (2008-2012)*. Retrieved September 5, 2023, from https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/progress-made-cutting-emissions/kyoto-1st-commitment-period-2008-12_it
- European Commission. (2012). *Flightpath 2050 - Europe's vision for aviation: maintaining global leadership and serving society's needs*. <https://doi.org/10.2777/15458>
- Fleming, G. G., de Lépinay, I., & Schaufele, R. (2022). Environmental Trends in Aviation to 2050. *International Civil Aviation Organization*. https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2022/ENVReport2022_Art7.pdf
- Gössling, S., & Humpe, A. (2020). The global scale, distribution and growth of aviation: Implications for climate change. *Global Environmental Change*, 65. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2020.102194>
- Grant, R. G. (2017). *Flight: The Complete History of Aviation*. In *Dorling Kindersley Ltd.*
- Grewe, V., Gangoli Rao, A., Grönstedt, T., Xisto, C., Linke, F., Melkert, J., Middel, J., Ohlenforst, B., Blakey, S., Christie, S., Matthes, S., & Dahlmann, K. (2021). Evaluating the climate impact of aviation emission scenarios towards the Paris agreement including COVID-19 effects. *Nature Communications*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24091-y>
- Hospodka, J., Bínová, H., & Pleninger, S. (2020). Assessment of all-electric general aviation aircraft. *Energies*, 13(23). <https://doi.org/10.3390/en13236206>
- IATA. (2015). *Sustainable Aviation Fuel Roadmap 1st Edition*. *International Air Transport Association*.
- IATA. (2023). *Annual Review 2023*. *International Air Transport Association*. <https://www.iata.org/contentassets/c81222d96c9a4e0bb4ff6ced0126f0bb/annual-review-2023.pdf>
- ICAO. (n.d.). *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA)*. *International Civil Aviation Organization*. Retrieved August 30, 2023, from <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/default.aspx>
- ICAO. (2019). *Environmental Report 2019*. *International Civil Aviation Organization*. <https://www.icao.int/environmental-protection/pages/envrep2019.aspx>
- ICAO. (2022). Report on the feasibility of a long-term aspirational goal (LTAG) for international civil aviation CO₂ emission reductions. *International Civil Aviation Organization*.

- IEA. (2019). *Are aviation biofuels ready for take off? – Analysis*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/commentaries/are-aviation-biofuels-ready-for-take-off>
- IEA. (2020). *China's Emissions Trading Scheme - Analysis*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/chinas-emissions-trading-scheme>
- IEA. (2023). *Aviation*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/energy-system/transport/aviation>
- IPCC. (1999). *Aviation and the Global Atmosphere*. Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/report/aviation-and-the-global-atmosphere-2/>
- IPCC. (2022). Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the Context of Sustainable Development. *Intergovernmental Panel on Climate Change*, 93–174. <https://doi.org/10.1017/9781009157940.004>
- ISPRA. (n.d.). *Protocollo di Kyoto*. Retrieved September 1, 2023, from <https://www.isprambiente.gov.it/it/servizi/registro-italiano-emission-trading/contesto/protocollo-di-kyoto>
- Jaramillo, P., Kahn Ribeiro, S., Newman, P., Dhar, S., Diemuodeke, O., Kajino, T., Lee, D., Nugroho, S., Ou, X., Hammer Strømman, A., Whitehead, J., Shukla, R., Skea, J., Slade, R., Al Khourdajie, A., van Diemen, R., McCollum, D., Pathak, M., Some, S., ... Gao, Y. (2022). Transport. *Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. <https://doi.org/10.1017/9781009157926.012>
- Kärcher, B. (2018). Formation and radiative forcing of contrail cirrus. In *Nature Communications* (Vol. 9, Issue 1). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04068-0>
- Kharina, A., & Rutherford, D. (2015). Fuel efficiency trends for new commercial jet aircraft: 1960 to 2014. *International Council on Clean Transportation (ICCT)*. https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/ICCT_Aircraft-FE-Trends_20150902.pdf
- Lee, D. S., Fahey, D. W., Forster, P. M., Newton, P. J., Wit, R. C. N., Lim, L. L., Owen, B., & Sausen, R. (2009). Aviation and global climate change in the 21st century. *Atmospheric Environment*, 43(22–23). <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.04.024>
- Lee, D. S., Fahey, D. W., Skowron, A., Allen, M. R., Burkhardt, U., Chen, Q., Doherty, S. J., Freeman, S., Forster, P. M., Fuglestvedt, J., Gettelman, A., De León, R. R., Lim, L. L., Lund, M. T., Millar, R. J., Owen, B., Penner, J. E., Pitari, G., Prather, M. J., ... Wilcox, L. J. (2021). The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. *Atmospheric Environment*, 244. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834>
- Liao, W., Fan, Y., Wang, C., & Wang, Z. (2021). Emissions from intercity aviation: An international comparison. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 95. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102818>
- Lim, M., Luckert, M. K. (Marty), & Qiu, F. (2023). Economic opportunities and challenges in biojet production: A literature review and analysis. In *Biomass and Bioenergy*. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106727>
- N3-X. (n.d.). Glenn Research Center | NASA. Retrieved September 1, 2023, from <https://www1.grc.nasa.gov/aeronautics/eap/airplane-concepts/n3x/>

- Petrescu, R. V. V., Aversa, R., Akash, B., Bucinell, R., Corchado, J., Berto, F., Mirsayar, M., Apicella, A., & Petrescu, F. I. T. (2017). History of Aviation-A Short Review. *Journal of Aircraft and Spacecraft Technology*, 1(1). <https://doi.org/10.3844/jastsp.2017.30.49>
- Pham, V. Van, Tang, J., Alam, S., Lokan, C., & Abbass, H. A. (2010). Aviation emission inventory development and analysis. *Environmental Modelling and Software*, 25(12). <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.04.004>
- Regional Greenhouse Gas Initiative (RGGI)* . (n.d.). Retrieved August 31, 2023, from <https://www.rggi.org/>
- Ritchie, H. (2020). *Climate change and flying: what share of global CO2 emissions come from aviation?* Our World in Data. <https://ourworldindata.org/co2-emissions-from-aviation>
- Ritchie, H. (2023). Where in the world do people have the highest CO2 emissions from flying? *Our World in Data*. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2018.05.013>
- Rutherford, D. (2020). *Standards to promote airline fuel efficiency*. www.theicct.orgcommunications@theicct.org
- Simpson, A. (2022). *The global energy transition: impossible challenge or unique opportunity?* ICIS Energy Series. <https://icis.shorthandstories.com/the-global-energy-transition-impossible-challenge-orunique-opportunity/index.html>
- Soone, J. (2020). Sustainable aviation fuels. *European Parliamentary Research Service (EPRS)*.
- United Nations. (1998). *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. United Nations Framework Convention on Climate Change. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-kyoto-protocol/history-of-the-kyoto-protocol/text-of-the-kyoto-protocol>
- United Nations. (2015). *The Paris Agreement*. United Nations Framework Convention on Climate Change. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>
- Western Climate Initiative (WCI)*. (n.d.). Retrieved August 31, 2023, from <https://wci-inc.org/>
- Yusaf, T., Fernandes, L., Talib, A. R. A., Altarazi, Y. S. M., Alrefae, W., Kadirgama, K., Ramasamy, D., Jayasuriya, A., Brown, G., Mamat, R., Dhahad, H. Al, Benedict, F., & Laimon, M. (2022). Sustainable Aviation—Hydrogen Is the Future. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 14, Issue 1). <https://doi.org/10.3390/su14010548>
- Zheng, S. (2019). *Not every tonne of aviation CO2 is created equal*. International Council on Clean Transportation (ICCT). <https://theicct.org/not-every-tonne-of-aviation-co2-is-created-equal/>