POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Gestionale

Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Gestionale

Tesi di Laurea Magistrale

I carburanti sostenibili nei trasporti aereo e marittimo

Quadro tecnologico, regolatorio ed economico e analisi econometrica del prezzo del SAF

Relatore
Prof. Dott. Carlo Cambini

Studente
Vincenzo D'Alonzo

A.A. 2025/2026

A mia zia

Sommario

Introduzione 1

Capitolo 1: Il trasporto aereo e marittimo e il ruolo dei carburanti sostenibili nella sfida alla decarbonizzazione 3

1.1 Il trasporto aereo e marittimo nel sistema economico globale 3

1.2 Il contributo del macrosettore alle emissioni climalteranti 9

1.3 Principali strategie di decarbonizzazione: benefici ambientali e *trade-off* 14

1.3.1 Settore aeronautico 14

1.3.2 Settore marittimo 17

1.4 Carburanti sostenibili per aviazione e trasporto marittimo: definizione, caratteristiche e classificazione 21

1.4.1 I carburanti sostenibili per l'aviazione: i SAF 21

1.4.2 I carburanti sostenibili per il trasporto marittimo 24

1.5 Percorsi e tecnologie produttive dei carburanti sostenibili 27

1.5.1 Settore aeronautico 27

1.5.2 Settore marittimo 35

1.6 Sfide tecnologiche per l'introduzione dei carburanti sostenibili 46

1.6.1 Settore aeronautico 46

1.6.2 Settore marittimo 49

1.7 Vincoli strutturali e criticità della transizione verso i carburanti sostenibili 52

1.7.1 Settore aeronautico 53

1.7.2 Settore marittimo 57

Capitolo 2: Il quadro normativo ed economico per l'introduzione dei carburanti sostenibili nei trasporti aereo e marittimo 62

2.1 La governance della decarbonizzazione nei trasporti aereo e marittimo 62

2.1.1 Settore aeronautico 65

2.1.2 Settore marittimo 66

2.2 Il ruolo delle organizzazioni internazionali: ICAO, il sistema CORSIA e IMO 68

2.2.1 Settore aeronautico 68

2.2.2 Settore marittimo 73

2.3 Il quadro normativo europeo per i carburanti sostenibili nei settori aereo e marittimo 75

2.3.1 Settore aeronautico 75

2.3.2 Settore marittimo 80
2.4 Criticità e limiti del quadro regolatorio internazionale ed europeo 84
2.4.1 Settore aeronautico 84
2.4.2 Settore marittimo 85
2.5 Domanda, offerta e struttura di mercato dei carburanti sostenibili 86
2.5.1 Settore aeronautico 87
2.5.2 Settore marittimo 100
2.6 Investimenti, infrastrutture, logistica e *supply chain* 106
2.6.1 Ruolo di aeroporti, porti e gestori aeroportuali 106
2.6.2 Ruolo delle compagnie aeree e marittime 114
2.6.3 Ruolo dei *fuel suppliers*, delle bioraffinerie e dei produttori di *e-fuels* 115
2.7 Incentivi economici, strumenti di mercato e condizioni per la scalabilità 117
2.7.1 Settore aeronautico 118
2.7.2 Settore marittimo 125
Capitolo 3: Analisi empirica delle determinanti di prezzo del SAF 131
3.1 Dal quadro teorico-regolatorio al problema empirico del prezzo 131
3.1.1 Il differenziale di prezzo come barriera economica 131
3.1.2 Focus dell'analisi empirica sui SAF 134
3.2 Dataset, fonti e costruzione delle variabili 134
3.3 Metodo econometrico 137
3.3.1 Analisi bivariata: matrice di correlazione e regressioni a coppie 138
3.3.2 Analisi multivariata aggregata: specificazione dei modelli e criteri di confronto 139
3.4 Risultati dell'analisi bivariata 140
3.4.1 Matrice di correlazione 140
3.4.2 Regressioni a coppie 142
3.4.3 Interpretazione economica dei risultati bivariati 152
3.5 Risultati dell'analisi multivariata aggregata 153
3.5.1 Confronto tra i modelli multivariati 159
3.5.2 Interpretazione economica dei risultati multivariati 160
3.6 Analisi del ruolo dell'Animal Fat nella dinamica del prezzo del SAF 163
3.6.1 Confronto dinamico tra SAF, Animal Fat, Palm Oil e Jet fuel (novembre 2024-maggio 2026) 164

3.6.2 Episodi chiave e interpretazione del canale Animal Fat rispetto al benchmark fossile 165
3.7 Limiti dell'analisi 167
Conclusioni 169
Bibliografia 171
Ringraziamenti 185

Indice delle figure

Figura 1.1: Ripartizione dell'occupazione diretta per i vari segmenti. 3
Figura 1.2: Crescita del commercio marittimo globale 4
Figura 1.3: VAL Stati europei 5
Figura 1.4: Impiegati nel settore marittimo 5
Figura 1.5: Ripresa volumi settore aereo 8
Figura 1.6: Ripresa volumi settore marittimo 8
Figura 1.7: Consumi di energia ed emissioni per i vari settori 9
Figura 1.8: Quote di emissioni di gas serra per il settore dei trasporti (UE-2023) 10
Figura 1.9: Ciclo documentazione 16
Figura 1.10: Riduzione delle emissioni dello scope 1 e 3 17
Figura 1.11: Generazione diretta. 18
Figura 1.12: Generazione indiretta 19
Figura 1.13: Cattura del carbonio a bordo (OCC) applicata alle grandi navi in relazione al numero di porti dotati di infrastrutture per lo scarico della CO_2 20
Figura 1.14: Processo di valutazione dei carburanti aeronautici secondo ASTM D4054 23
Figura 1.15: Schema del percorso di qualificazione e utilizzo dei SAF 23
Figura 1.16: Principali fasi del processo HEFA. 30
Figura 1.17: Schema di produzione di prodotti FT da biomasse 31
Figura 1.18: Schema delle fasi del processo ATJ 32
Figura 1.19: Schema di processo ATJ, con produzione di composti intermedi 33
Figura 1.20: Schema di processo relativo allo step di CHJ 34
Figura 1.21: Schema di produzione del PtL 35
Figura 1.22: Crescita del numero di navi alimentate da combustibili alternativi 36

Figura 1.23: Confronto delle navi attualmente esistenti (barre scure) con quelle ordinate nei cantieri navali (barre chiare)....36
Figura 1.24: Numero di navi alimentate da combustibili alternativi aggiunte all'orderbook nel 2025, per tipologia di fuel e distribuzione mensile....37
Figura 1.25: Schema del processo di produzione del bioLNG....38
Figura 1.26: Schema di produzione del bioLPG come co-prodotto del processo HVO....39
Figura 1.27: Schema di produzione del Biodiesel (FAME)....40
Figura 1.28: Percorsi di produzione del metanolo convenzionale, bio-metanolo ed e-metanolo....42
Figura 1.29: Schema generale del processo di produzione degli e-fuels....44
Figura 1.30: Fuel Readiness Level per carburanti aeronautici alternativi....47
Figura 1.31: CFM RISE....49
Figura 1.32: Rolls-Royce UltraFan....49
Figura 1.33: Previsione della necessità di formazione di personale marittimo....51
Figura 1.34: Quantità potenziali di biocarburanti avanzati per tipologia di feedstock al 2030 e al 2050, considerando le massime rese di processo e la totale disponibilità di biomassa sostenibile per bioenergia....52
Figura 1.35: Materie prime per la produzione di SAF in EU28 al 2030....53
Figura 1.36: Materie prime e processi per la produzione di SAF....53
Figura 1.37: Materie prime e principali processi di conversione ad oggi disponibili per la produzione di biocombustibili....54
Figura 1.38: Confronto delle previsioni FTG per SAF in Mt nel 2035, per scenario e tipo di feedstock....55
Figura 1.39: SAF Facilities Dashboard....56
Figura 1.40: Schema della supply chain di SAF....56
Figura 1.41: Densità energetica e caratteristiche fisiche dei combustibili....57
Figura 1.42: Evoluzione dell'uso energetico e del mix di combustibili nel trasporto marittimo (2018–2050) nello scenario coerente con gli obiettivi IMO....58
Figura 1.43: Flusso operativo e logistico della catena di fornitura dei combustibili marini....59
Figura 1.44: Confronto tra combustibili marittimi (costo vs emissioni)....60
Figura 1.45: Crescita della flotta alimentata a LNG e sviluppo dell'infrastruttura di bunkering LNG nel trasporto marittimo....60
Figura 2.1: Aumento delle emissioni con e senza l'Accordo di Parigi....62

Figura 2.2: Ripartizione delle misure legate agli oceani all'interno degli NDC 64
Figura 2.3: Contributo delle tecnologie nella riduzione delle emissioni 65
Figura 2.4: Confronto del ciclo di vita Well-to-Wake (WtW) tra carburanti fossili convenzionali e Sustainable Aviation Fuels (SAF) 66
Figura 2.5: Rappresentazione del potenziale Carbon Leakage e della deviazione delle rotte marittime verso hub meno regolamentati in assenza di uno standard globale IMO 67
Figura 2.6: I pilastri strategici per la riduzione delle emissioni nel settore aeronautico 69
Figura 2.7: Stato di implementazione di CORSIA 70
Figura 2.8: Analisi comparativa dell'impatto delle diverse baseline CORSIA sulle proiezioni al 2030 71
Figura 2.9: Cronostoria delle azioni regolatorie dell'IMO per la riduzione delle emissioni di gas serra 74
Figura 2.10: Cronoprogramma (Phase-in) per l'estensione del sistema EU ETS al trasporto marittimo 84
Figura 2.11: Quota SAF erogata negli aeroporti UE nel 2024 e proiezioni al 2030. 88
Figura 2.12: Classificazione degli Stati membri EU in base alla presenza o assenza di infrastrutture produttive di SAF 90
Figura 2.13: Metodologia di calcolo del punteggio di maturità dei progetti di impianti produttivi di SAF 91
Figura 2.14: Disponibilità potenziale di materie prime da biomassa a livello globale per la produzione di SAF nel 2030 e nel 2050 96
Figura 2.15: Disponibilità potenziale regionale di biomassa per la produzione di SAF nel 2030 e nel 2050 96
Figura 2.16: Disponibilità di CO_2 biogenica in Mt nel 2050 98
Figura 2.17: Proiezioni dell'attività di trasporto marittimo internazionale per scenario 101
Figura 2.18: Domanda energetica per il trasporto marittimo internazionale nello scenario Net Zero Emissions entro il 2050 102
Figura 2.19: Stime della produzione globale di low-GHG fuels per il 2032 103
Figura 2.20: Numero di aeroporti che ricevono SAF a livello globale 112
Figura 2.21: Prezzi dei combustibili sostenibili 118
Figura 2.22: Stato degli accordi di acquisto (offtake) di SAF a livello globale 123
Figura 2.23: Panoramica del mercato dei carburanti sostenibili per l'aviazione (SAF) a livello UE 124

Figura 2.24: Total Cost of Ownership per diversi combustibili marittimi (scenario con e senza incentivi e-fuels) 126
Figura 2.25: Mappa dei corridoi verdi marittimi attivi nel 2024 129
Figura 3.1: Differenza di prezzo tra SAF e cherosene per aerei tradizionali in Europa tra fine 2024 e inizio 2026 133
Figura 3.2: Andamento dei prezzi del SAF, Jet fuel, Brent e Nafta 141
Figura 3.3: Correlazioni logaritmiche con il prezzo del SAF 142
Figura 3.4: Relazione andamento prezzi SAF / Jet fuel 143
Figura 3.5: Relazione andamento prezzi SAF / Brent 144
Figura 3.6: Relazione andamento prezzi SAF / Nafta 146
Figura 3.7: Relazione andamento prezzi SAF / Palm Oil 147
Figura 3.8: Relazione andamento prezzi SAF / Animal Fat 148
Figura 3.9: Relazione andamento prezzi SAF / Metanolo 150
Figura 3.10: Relazione andamento prezzi SAF / Etanolo 151
Figura 3.11: Confronto tra R^2 e R^2 corretto dei modelli multivariati. 159
Figura 3.12: Andamento indicizzato dei prezzi delle principali variabili (novembre 2024 = 100) 160
Figura 3.13: Confronto tra coefficienti bivariati e coefficienti multivariati 161
Figura 3.14: Scomposizione Shapley dell'R^2 incrementale per blocchi 162

Indice delle tabelle

Tabella 1.1: Processi di conversione SAF approvati secondo le specifiche ASTM D7566 e ASTM D1655 28
Tabella 1.2: Processi di conversione dei SAF in fase di valutazione. 29
Tabella 1.3: Tabella comparativa dei pathway SAF considerati 48
Tabella 3.1: Matrice di correlazione tra i log-prezzi 140
Tabella 3.2: Regressione Jet fuel/SAF senza dummy temporali. 143
Tabella 3.3: Regressione Jet fuel/SAF con dummy temporali. 144
Tabella 3.4: Regressione Brent/SAF senza dummy temporali 145
Tabella 3.5: Regressione Brent/SAF con dummy temporali 145
Tabella 3.6: Regressione Nafta/SAF senza dummy temporali 146

Tabella 3.7: Regressione Nafta/SAF con dummy temporali 146
Tabella 3.8: Regressione Palm Oil/SAF senza dummy temporali 147
Tabella 3.9: Regressione Palm Oil/SAF con dummy temporali 148
Tabella 3.10: Regressione Animal Fat/SAF senza dummy temporali 149
Tabella 3.11: Regressione Animal Fat/SAF con dummy temporali. 149
Tabella 3.12: Regressione Metanolo/SAF senza dummy temporali. 150
Tabella 3.13: Regressione Metanolo/SAF con dummy temporali 150
Tabella 3.14: Regressione Etanolo/SAF senza dummy temporali 151
Tabella 3.15: Regressione Etanolo/SAF con dummy temporali 152
Tabella 3.16: Regressione SAF - Jet fuel 153
Tabella 3.17: Regressione SAF - Jet fuel - Palm Oil - Animal Fat 154
Tabella 3.18: Regressione SAF - Jet fuel - Palm Oil - Animal Fat - Etanolo 155
Tabella 3.19: Regressione SAF - Brent - Palm Oil - Animal Fat. 156
Tabella 3.20: Regressione SAF - Nafta - Palm Oil - Animal Fat. 156
Tabella 3.21: Regressione SAF - Palm Oil - Animal Fat - Metanolo 157
Tabella 3.22: Regressione SAF - Palm Oil - Animal Fat - Etanolo 158
Tabella 3.23: Sintesi delle regressioni multivariate M0-M6 159
Tabella 3.24: Variazioni mensili delle variabili nella finestra comune 164

Introduzione

La decarbonizzazione dei trasporti aereo e marittimo rappresenta una delle sfide più complesse della transizione energetica contemporanea. Questi due settori sono indispensabili per il funzionamento dell'economia globale, poiché sostengono la mobilità internazionale di persone e merci, la continuità delle catene logistiche e l'integrazione dei mercati. Allo stesso tempo, essi presentano caratteristiche tecniche e operative che rendono difficile una rapida riduzione delle emissioni: elevata intensità energetica, necessità di combustibili ad alta densità, lunga vita utile degli asset, infrastrutture costruite attorno ai combustibili fossili e forte esposizione alla concorrenza internazionale. Proprio per questa ragione, aviazione e trasporto marittimo sono comunemente ricondotti tra i settori *hard-to-abate*.

In tale contesto, i carburanti sostenibili rappresentano una delle soluzioni più praticabili nel breve e medio periodo, ma la loro diffusione non dipende soltanto dalla possibilità tecnica di produrli. La transizione richiede infatti che le nuove filiere siano sostenibili lungo il ciclo *well-to-wake*, compatibili con gli standard di sicurezza, disponibili in volumi adeguati, integrate nelle infrastrutture esistenti o future e, soprattutto, economicamente praticabili per operatori che competono in mercati globali. Il tema dei carburanti sostenibili deve quindi essere affrontato come problema sistemico, nel quale tecnologia, regolazione, finanza, logistica e formazione del prezzo sono strettamente interdipendenti.

In questo contesto, la presente tesi analizza i carburanti sostenibili per aviazione e trasporto marittimo come strumenti di decarbonizzazione inseriti in un quadro industriale e regolatorio ancora in costruzione, e mira a comprendere quali condizioni ne rendano possibile l'adozione effettiva. La domanda di fondo riguarda quindi la scalabilità: in che misura i carburanti sostenibili possono contribuire alla riduzione delle emissioni nei settori *hard-to-abate* e quali vincoli ne limitano oggi la diffusione su larga scala?

Il confronto tra aviazione e trasporto marittimo consente di mettere in evidenza due traiettorie diverse. Nel settore aeronautico, i Sustainable Aviation Fuels (SAF) costituiscono la soluzione più immediatamente rilevante, perché possono essere impiegati come carburanti *drop-in* entro i limiti di miscelazione consentiti dagli standard tecnici. Nel trasporto marittimo, invece, non esiste un equivalente unico dei SAF: la transizione si articola attraverso una pluralità di combustibili e vettori energetici, tra cui biocarburanti, metanolo, ammoniaca, idrogeno, LNG e combustibili sintetici. Questa differenza non è solo tecnologica, ma incide sulla costruzione della domanda, sugli investimenti infrastrutturali, sui criteri di certificazione e sulla formazione dei prezzi.

La tesi sviluppa l'analisi su tre livelli. Il Capitolo 1 ricostruisce il ruolo economico e ambientale dei due settori e individua le principali soluzioni tecnologiche oggi disponibili o in fase di sviluppo. Il Capitolo 2 esamina il quadro normativo ed economico, con particolare attenzione alla funzione delle istituzioni internazionali, degli strumenti europei, degli incentivi e dei meccanismi di mercato. Il Capitolo 3 introduce un'analisi empirica delle

determinanti del prezzo del SAF. Tale scelta è motivata dalla maggiore disponibilità di dati comparabili per il settore aeronautico, mentre nel comparto marittimo la pluralità delle soluzioni e la minore liquidità dei mercati non consentono di individuare una serie storica unitaria altrettanto interpretabile.

L'analisi empirica non intende ricostruire il costo industriale di un singolo impianto, né formulare una funzione definitiva del prezzo del SAF. Essa mira piuttosto a verificare quali canali di mercato risultino osservabili nel periodo considerato, distinguendo tra *benchmark* fossili, prodotti di raffinazione, *feedstock* lipidici e input collegati a *pathway* alternativi. In questo quadro si inserisce anche l'approfondimento sul canale Animal Fat, utilizzato come proxy dei grassi animali e dei lipidi residuali collegati alla filiera HEFA. Tale approfondimento consente di valutare se un segmento specifico dei *feedstock* residuali mostri segnali coerenti con la dinamica del prezzo del SAF, senza trasformare tale coerenza in una prova causale automatica.

Il contributo della tesi consiste quindi nel collegare la dimensione tecnologica e regolatoria della decarbonizzazione con quella economica del prezzo. Il costo dei carburanti sostenibili non viene trattato come un ostacolo esterno alla transizione, ma come il punto in cui si rendono visibili i vincoli della filiera: disponibilità delle materie prime, maturità produttiva, struttura dei contratti, rischio degli investimenti, tracciabilità e grado di autonomia del mercato rispetto ai combustibili fossili. Da questa prospettiva, la transizione dei trasporti aereo e marittimo non dipende dalla sola introduzione di nuovi carburanti, ma dalla capacità di costruire mercati credibili, infrastrutture adeguate e regole sufficientemente stabili da rendere tali soluzioni scalabili nel tempo.

Capitolo 1: Il trasporto aereo e marittimo e il ruolo dei carburanti sostenibili nella sfida alla decarbonizzazione

1.1 Il trasporto aereo e marittimo nel sistema economico globale

Il settore dei trasporti presenta una duplice natura: da un lato rappresenta un fattore importante per la crescita economica e l'integrazione dei mercati globali, dall'altro costituisce una delle principali fonti di emissioni climalteranti. Ciò fa sì che debba essere riposta nei suoi confronti una particolare attenzione, sia da parte degli Stati che delle istituzioni sovranazionali, al fine di identificare strumenti di regolazione che consentano di soddisfare la crescente domanda di trasporti riducendo al contempo le emissioni.

Il ruolo del trasporto aereo risulta centrale, essendo l'unica modalità di trasporto in grado di permettere la percorrenza di tratte a lungo raggio in tempi brevi. Tale caratteristica lo rende indispensabile sia per il commercio che per il turismo. In particolare, è stato stimato che, a livello globale, circa il 58% dei turisti internazionali viaggia in aereo[1].

Inoltre, l'influenza dell'aviazione sull'attività economica è di certo molto rilevante. Infatti, nel 2023, le 1.138 compagnie aeree del mondo hanno trasportato complessivamente 4,4 miliardi di passeggeri verso 4.072 aeroporti commerciali in tutto il mondo e hanno movimentato 61,4 milioni di tonnellate di merci[1]. Questo implica che il settore dell'aviazione si distingue per la rilevante quantità di occupazione che è in grado di generare, a livello di compagnie aeree, aeroporti, produttori di aeromobili, motori e altre tecnologie e fornitori di servizi di navigazione aerea. È stato stimato dall'Air Transport Action Group che, nel 2023, il settore ha generato 11,6 milioni di posti di lavoro diretti e ha contribuito con 1.100 miliardi di dollari al prodotto interno lordo globale (cfr. Figura 1.1). Per contestualizzare, ciò equivale all'1% del PIL globale, o è comparabile al settore globale della produzione di autoveicoli (1.100 miliardi di dollari)[1].

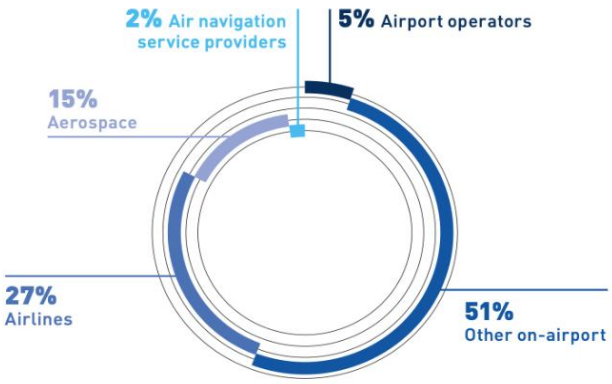


Figura 1.1: Ripartizione dell'occupazione diretta per i vari segmenti.
Fonte: ATAG (dicembre 2024), Aviation Benefit Beyond Borders

A livello europeo, il trasporto aereo ha sostenuto 15 milioni di posti di lavoro e ha contribuito con 1.200 miliardi di dollari al PIL dell'UE. Ciò equivale a un posto di lavoro su 25 in tutto il continente, al 4% di tutta l'occupazione e al 4,6% del PIL totale dei paesi europei nel 2023[1].

Nel contesto dell'economia globale, oltre all'aviazione, anche il trasporto marittimo si configura come un'infrastruttura essenziale, capace di generare benefici significativi in termini di scambi commerciali e conseguente supporto alla crescita economica.

Nel 2024 i volumi del commercio marittimo hanno raggiunto i 12.720 milioni di tonnellate, con una crescita del 2,2%, superando la media del periodo 2013-2023 (1,8%). A sostenere questa crescita sono stati principalmente due fattori: la resiliente domanda dei consumatori negli Stati Uniti d'America e i forti flussi commerciali dall'Asia verso le economie emergenti.

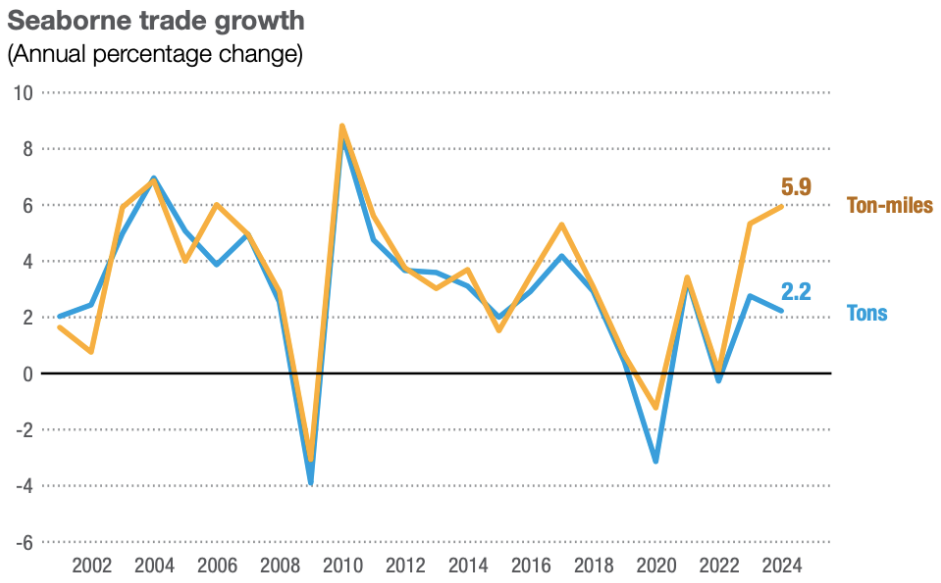


Figura 1.2: Crescita del commercio marittimo globale.
Fonte: Review of Maritime Transport 2025

Questo andamento positivo deve tuttavia essere letto alla luce del tasso di crescita registrato nello stesso periodo (cfr. Figura 1.2), che è risultato inferiore alla media del periodo 2003-2023, pari al 2,9%. Ciò indica una decelerazione a lungo termine nell'espansione del volume globale, causata soprattutto da fattori quali i ripetuti shock economici, l'aumento delle barriere commerciali, l'instabilità politica e la frammentazione geopolitica[2].

[1] *ATAG, Aviation Benefit Beyond Borders.*
[2] *United Nations, Review of maritime transport, 2025.*

All’interno dell’EU Blue Economy Report del 2025, viene data la definizione del termine “Blue Economy”, la quale comprende le attività economiche che sono:

- basate sul mare, incluse quelle svolte nell'oceano, nel mare e nelle aree costiere, come la pesca e l'acquacoltura, la produzione di petrolio e gas offshore, la produzione di energia eolica offshore, la produzione di energia oceanica, la desalinizzazione, il trasporto marittimo e la navigazione, e il turismo marittimo e costiero;
- correlate al mare, incluse quelle che utilizzano i prodotti e/o producono beni e servizi per attività basate sul mare, come la lavorazione dei prodotti ittici, le biotecnologie marine, la costruzione e la riparazione navale, le attività portuali, le comunicazioni marittime, l'utilizzo di attrezzature marittime, le assicurazioni marittime e la sorveglianza marittima[3].

Di conseguenza, rientra in questa definizione anche il trasporto via mare e, secondo tale report, viene confermata la crescita dei settori della Blue Economy dell'Unione Europea: si è stimato che, nel 2023, il valore aggiunto lordo (VAL) abbia raggiunto i 263 miliardi di euro e che l'occupazione abbia raggiunto i 4,89 milioni di persone[3].

A livello di occupazione, il report dell’UE afferma che la Germania detiene il primato per numero di occupati nel settore del trasporto marittimo, rappresentando il 33% del totale, seguita da Italia (17%) e Francia (10%). La Germania, inoltre, genera il 52% del valore aggiunto lordo (VAL) degli Stati membri in questo settore, seguita da Danimarca (13%) e Paesi Bassi (10%) (cfr. Figure 1.3 e 1.4).

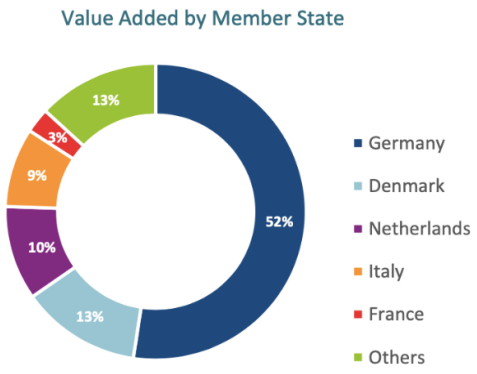


Figura 1.3: VAL Stati europei.
Fonte: EU Blue Economy Report 2025

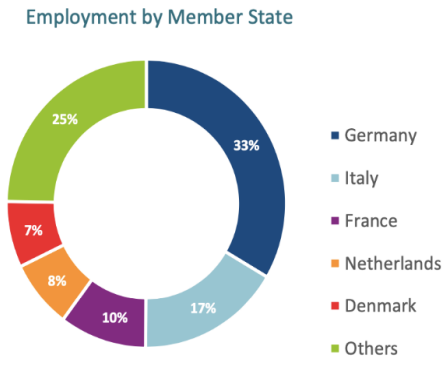


Figura 1.4: Impiegati nel settore marittimo.
Fonte: EU Blue Economy Report 2025

[3] *European Commission, EU Blue Economy Report, 2025.*

I dati sopra riportati evidenziano dunque che i settori del trasporto aereo e marittimo giocano un ruolo fondamentale nell'ambito della generazione di valore economico e dell'occupazione, sia a livello europeo che globale.

È inoltre opportuno evidenziare come questi settori siano esposti a una forte variabilità, poiché risentono di fattori geopolitici, innovazioni tecnologiche e transizione energetica. In particolare, negli ultimi decenni, la combinazione di cambiamenti climatici e tensioni geopolitiche ha rappresentato uno dei rischi più significativi per il trasporto marittimo e aereo globale. Tale criticità è emersa in modo evidente anche nel contesto della recente guerra che ha coinvolto gli Stati Uniti e l'Iran, la quale ha determinato l'interruzione di alcune delle principali rotte commerciali, con conseguenti deviazioni operative e l'aumento dei costi logistici.

Questo fenomeno incide in misura ancora maggiore sul commercio marittimo poiché la possibilità di attraversare gli stretti strategici è una condizione imprescindibile per il funzionamento efficiente degli scambi globali, essendo le rotte difficilmente sostituibili senza significativi incrementi di tempi e costi di trasporto. A tal proposito, secondo l'EU Blue Economy Report del 2025, "diversificare le rotte marittime è fondamentale per ridurre la dipendenza da un numero limitato di passaggi critici, mentre una maggiore cooperazione tra spedizionieri, fornitori di servizi logistici e porti può contribuire a ottimizzare l'efficienza della catena di approvvigionamento. Allo stesso tempo, sfruttare la tecnologia, i dati e l'analisi predittiva migliorerà le previsioni della domanda, potenzierà i sistemi di allerta precoce e consentirà una migliore gestione della capacità nei punti critici, mitigando in definitiva i rischi derivanti dall'instabilità geopolitica e dai cambiamenti climatici"[3].

Emerge quindi, anche in questo campo, l'importanza della digitalizzazione e, in particolare, dell'uso dell'intelligenza artificiale. Quest'ultima potrebbe, ad esempio, contribuire ad ottimizzare i percorsi sulla base dei dati storici e delle condizioni di traffico in tempo reale, consentendo di ridurre i costi e migliorare i tempi di percorrenza. Inoltre, potrebbe supportare anche la previsione della domanda e anticipare le esigenze di manutenzione delle apparecchiature, limitando i tempi di inattività e contribuendo a prolungare il ciclo di vita degli asset[3].

In tale prospettiva, la digitalizzazione può svolgere un ruolo importante anche per il monitoraggio delle emissioni: si sono registrati progressi significativi, sostenuti dall'introduzione di normative europee sempre più stringenti, volte a promuovere un trasporto marittimo più sostenibile, come il sistema di scambio di quote di emissione (ETS) dell'UE e il regolamento FuelEU marittimo.

Anche nel settore aeronautico l'utilizzo dell'intelligenza artificiale potrebbe portare numerosi benefici, data la sua principale caratteristica di riuscire ad elaborare una vastissima quantità di dati e apprendere da questi ultimi. La European Union Aviation Safety Agency (EASA) ha individuato i seguenti vantaggi che possono derivare dall'utilizzo dell'AI nell'aviazione:

- assistenza per le operazioni di volo: può assistere l'equipaggio riguardo alle procedure di routine e può anticipare problemi come turbolenze e condizioni di formazione di ghiaccio, aiutando i piloti di conseguenza;
- manutenzione: possedendo tutti i dati necessari riguardo agli aeromobili, può prevedere la vita utile residua dei componenti e quindi prevenire i guasti;
- riduzione delle emissioni di CO_2: può pianificare le traiettorie di volo ottimali affinché i voli producano meno anidride carbonica possibile. Inoltre, può essere utile anche per quanto riguarda la valutazione dell'impatto ambientale dell'aviazione in termini di rumore intorno agli aeroporti, essendo un'attività che richiede un'elevata quantità di dati e di calcolo;
- gestione del traffico aereo: avendo a disposizione sia i dati sulle condizioni meteorologiche che quelli sulle condizioni del traffico, l'intelligenza artificiale potrebbe supportare l'ottimizzazione delle rotte, riducendo i tempi di percorrenza, il consumo di carburante e i costi;
- assistenza per gli aeroporti: potrebbe aiutare con il rilevamento di eventuali detriti estranei sulla pista e con la prevenzione degli impatti con gli uccelli. Può avere un ruolo anche all'interno del terminal aeroportuale, in particolare con i controlli di sicurezza e il rilevamento di merci pericolose;
- sicurezza informatica: l'intelligenza artificiale può contribuire alla prevenzione di attacchi informatici[4].

Nonostante i benefici delineati, permane però il limite intrinseco ai settori aereo e marittimo della dipendenza da fattori esogeni, come evidenziato dal caso emblematico della pandemia da COVID-19.

A tal proposito, la pandemia di COVID-19 ha portato profondi cambiamenti sociali, economici e ambientali e, come la maggior parte dei settori dell'economia, anche quello dei trasporti ha risentito del suo impatto in tutte le sue modalità. I lockdown e le varie restrizioni hanno infatti comportato limitazioni senza precedenti alla circolazione di persone e merci, sia a livello nazionale che internazionale. Tale significativa interruzione delle catene di approvvigionamento globali ha determinato una diminuzione del traffico aereo passeggeri del 60% nel 2020[5].

Anche il settore del trasporto marittimo ha risentito della pandemia. L'analisi degli scali navali nei porti dell'UE evidenzia che il numero di scali è diminuito del 10% nel 2020 rispetto al 2019 e la diminuzione più significativa è stata rilevata per le navi portacontainer, le navi frigorifere e le navi per il trasporto di veicoli. Il settore delle navi da crociera è stato però quello maggiormente colpito dal COVID-19 poiché la presenza di un gran numero di

[4] *EASA, Artificial Intelligence and Aviation.*
[5] *ITF Transport Outlook 2023.*

persone in spazi ristretti su tali navi rendeva i passeggeri e l'equipaggio più vulnerabili alle malattie infettive[6].

Sebbene il calo iniziale degli scambi commerciali sia stato paragonabile a quello dovuto alla crisi finanziaria globale del 2008, è stato possibile registrare una ripresa a V entro il 2021. I dati dell'ITF mostrano che i volumi di trasporto merci via mare e via aerea si sono completamente ripresi entro il terzo trimestre del 2021[5] (cfr. Figure 1.5 e 1.6).

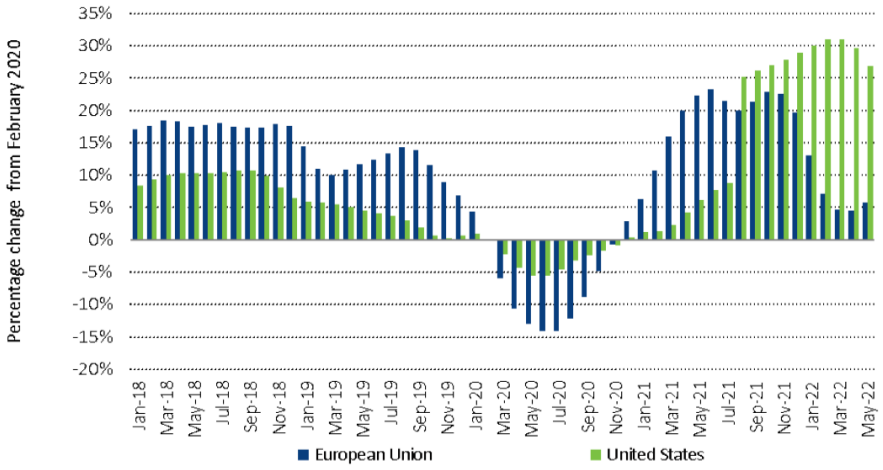


Figura 1.5: Ripresa volumi settore aereo.
Fonte: ITF Transport Outlook 2023

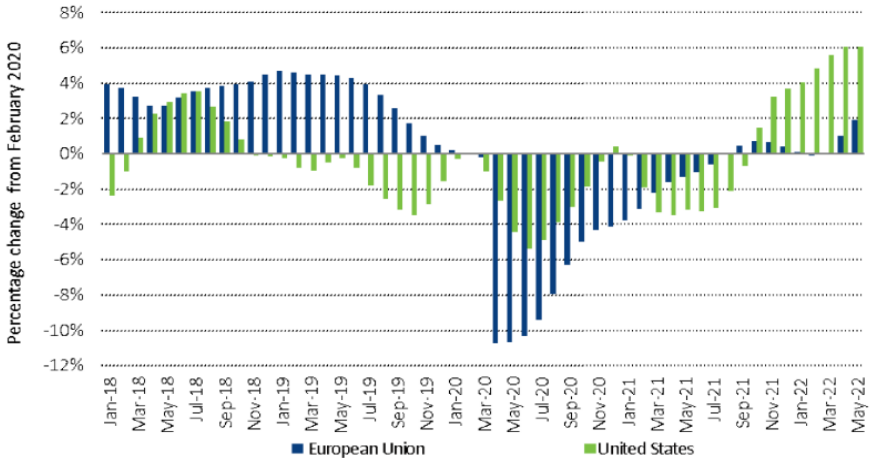


Figura 1.6: Ripresa volumi settore marittimo.
Fonte: ITF Transport Outlook 2023

Il settore del trasporto aereo e quello del trasporto marittimo sono fortemente influenzati da fattori esterni, come la pandemia da COVID-19 e i conflitti geopolitici, poiché sono eventi

[6] *EMSA, COVID-19 impact on shipping - 2nd quarter 2022.*

che incidono in modo diretto sulle dinamiche dei mercati energetici. Infatti, un aumento del prezzo del petrolio implica necessariamente anche l'aumento del prezzo del carburante, il quale è la principale voce di costo per le compagnie aeree e marittime.

Tali problematiche possono però anche tradursi in opportunità: le crisi energetiche e l'instabilità dei mercati potrebbero infatti portare molti paesi e operatori ad incrementare gli investimenti in energie rinnovabili e in altre soluzioni, come ad esempio i carburanti sostenibili, il cui utilizzo può essere incentivato proprio dall'incertezza dei prezzi dei carburanti tradizionali.

1.2 Il contributo del macrosettore alle emissioni climalteranti

Nell'ambito dei trasporti, il settore aereo e quello marittimo sono notoriamente considerati come *hard-to-abate* poiché, insieme agli autocarri pesanti, all'industria siderurgica, chimica e petrolchimica e al cemento, richiedono circa un quarto del consumo energetico mondiale e sono responsabili di circa un quinto delle emissioni globali totali di CO_2[7] (cfr. Figura 1.7).

2023	Heavy-duty trucks	Shipping	Aviation	Iron and steel	Chemicals and petrochemicals	Cement
Activity	32.7 trillion tkm	111 trillion tkm	8 trillion pkm 220 billion tkm	1.89 billion tonnes	736 million tonnes	4.07 million tonnes
Energy consumption [EJ/year]	28.3	11.2	13.2	36.8	19	12
CO_2 emissions [Gt]	1.89	0.86	0.94	2.8	1.34	2.3

Figura 1.7: Consumi di energia ed emissioni per i vari settori.
Fonte: IRENA

Nello specifico, nel 2023, l'aviazione ha contribuito per il 3% del consumo energetico globale e per il 3% delle emissioni globali di anidride carbonica, mentre il trasporto via mare ha richiesto il 2% del consumo energetico globale e ha prodotto il 3% delle emissioni globali di CO_2[7]. In particolare, nel settore dei trasporti nell'UE il settore dell'aviazione e quello

[7] *IRENA, Enablers to decarbonize the hard-to-abate sectors.*

marittimo presentano una percentuale di emissioni di gas serra rispettivamente del 13,1% e 13,4% (cfr. Figura 1.8).

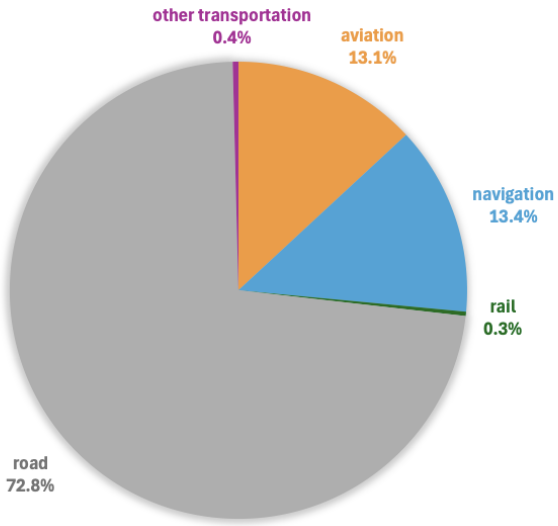


Figura 1.8: Quote di emissioni di gas serra per il settore dei trasporti (UE-2023)
Fonte dati: European Environment Agency

Ad incidere in modo così significativo sulle emissioni di inquinanti è la necessità di utilizzare combustibili ad alta densità energetica, i quali sono difficili da sostituire a causa delle caratteristiche specifiche dei mezzi di trasporto considerati. A ciò si aggiunge anche il fatto che il traffico di viaggiatori e il commercio sono sempre più in aumento, a scapito delle altre tipologie di trasporto: basti pensare che ogni anno circa il 90% delle merci scambiate a livello internazionale viene trasportato via mare[8], rendendo le imbarcazioni mercantili la modalità principale di commercio globale.

Pertanto, pur essendo indiscussa l'importanza del trasporto marittimo, permane la necessità di individuare soluzioni alternative all'utilizzo dei combustibili fossili. Un elemento che rallenta questa transizione è quello della rotazione delle flotte navali: poiché le navi commerciali possono rimanere in servizio per decenni, la flotta globale si rinnova lentamente. Questo significa che è necessario introdurre nuove soluzioni al più presto in quanto il modo in cui vengono costruite oggi le navi avrà conseguenze sul clima per i decenni a venire. Ad oggi, la quasi totalità dell'energia utilizzata nel trasporto marittimo internazionale proviene dalla combustione di combustibili fossili, costituiti per lo più da olio combustibile pesante, residuo della raffinazione del petrolio[9].

Tra i nuovi combustibili per il trasporto marittimo che sono stati proposti figurano: metanolo, ammoniaca, biocarburanti e idrogeno. Tali soluzioni potrebbero ridurre significativamente l'inquinamento climatico, ma nessuna di esse è attualmente pronta per

[8] *IMO, Marine Environment.*
[9] *Climate Portal, Sea Transport.*

essere utilizzata su larga scala. Anche i combustibili più puliti però, come l'idrogeno, devono essere prodotti e, ad oggi, provengono tutti principalmente da combustibili fossili, la cui produzione emette gas serra. Potrebbero essere prodotti da risorse non fossili con metodi che generano un inquinamento climatico significativamente inferiore, ma tutto ciò non è ancora economicamente competitivo. È infatti importante condurre un'attenta valutazione di tutte le emissioni "dal pozzo alla scia" per la produzione di questi combustibili, ossia la quantità totale di gas serra prodotta prima e dopo aver raggiunto la sala macchine di una nave. Questi combustibili non possono però essere semplicemente sostituiti al carburante tradizionale in quanto non sono compatibili con le navi attuali. Di conseguenza, sarebbe necessario o sostituire le imbarcazioni ad oggi in uso oppure apportare modifiche sostanziali[9].

In realtà, oltre a questi nuovi combustibili, si possono individuare anche altre due possibilità: l'energia nucleare e le batterie elettriche. Alcune navi militari e rompighiaccio sono già alimentate da reattori nucleari, che non producono alcuna emissione di CO_2 e, a tal proposito, potrebbero essere prodotti nuovi reattori di dimensioni ridotte, come le "batterie nucleari" pronte all'uso, per rendere tale soluzione praticabile anche per il trasporto marittimo commerciale. Anche le batterie elettriche sono oggetto di studio per le navi, sia in configurazioni ibride che come unica fonte di energia. Oggi, la propulsione completamente elettrica è considerata principalmente un'opzione per le imbarcazioni che effettuano brevi viaggi in acque costiere poiché le batterie sono ingombranti e i lunghi viaggi in mare richiedono un'enorme quantità di energia con scarse opportunità di ricarica. Inoltre, le navi dotate di batterie necessitano di nuove infrastrutture di ricarica nei porti di attracco. Tuttavia, con il continuo miglioramento delle tecnologie e la riduzione dei costi delle batterie, potrebbero aprirsi nuove opportunità per alcuni settori del trasporto marittimo[9].

Anche il settore aeronautico è ad alta intensità energetica: ad esempio, una persona che vola da Lisbona a New York e ritorno genera all'incirca lo stesso livello di emissioni di un cittadino medio dell'UE che riscalda la propria casa per un intero anno[10]. Il trasporto aereo, nel 2023, ha generato circa il 13,1% delle emissioni del settore dei trasporti dell'UE, risultando la terza maggiore fonte di emissioni di gas serra nel settore, dopo il trasporto su strada e via mare. Inoltre, l'Organizzazione Internazionale dell'Aviazione Civile (ICAO) ha previsto che entro il 2050 le emissioni del trasporto aereo internazionale potrebbero triplicare rispetto al 2015[10].

Oltre alla CO_2, i motori degli aerei rilasciano vari altri gas climalteranti, come ossidi di azoto (NOx), anidride solforosa (SO_2), vapore acqueo e particolato, tra cui solfati e fuliggine. Quando queste emissioni si verificano ad alta quota, influenzano le proprietà fisiche e chimiche dell'atmosfera e possono portare alla formazione di persistenti nubi cirriformi, le quali contribuiscono al riscaldamento globale poiché trattengono il calore

[10] *European Commission, Reducing emissions from aviation.*

terrestre. Come confermato dall'agenzia europea per la sicurezza aerea (EASA), gli effetti climalteranti diversi dalle emissioni di anidride carbonica, cioè impatti non-CO_2, hanno rappresentato più della metà (66%) dell'impatto totale del settore dell'aviazione nel 2018[10].

Questo aspetto risulta essere di particolare rilevanza in quanto l'inquinamento atmosferico rappresenta il principale rischio ambientale per la salute in Europa, con molteplici impatti sulla salute umana. In questo senso, il particolato fine ($PM_{2.5}$) e il biossido di azoto (NO_2) sono due dei principali inquinanti atmosferici. Nell'UE-27, nel 2022, il settore dei trasporti è stato il principale emettitore di ossidi di azoto (NOx) con una quota del 56,5% e, nello stesso anno, i trasporti hanno anche prodotto il 29,3% delle emissioni di PM_{10} e $PM_{2.5}$ nell'UE-27. In particolare, il trasporto marittimo provoca attualmente il 39% di tutte le emissioni di NO_x provenienti dai trasporti nell'UE-27 e il 43% del particolato totale ($PM_{2.5}$) derivante dalle emissioni dei trasporti[11].

Questi dati dimostrano che il monitoraggio della qualità dell'aria all'interno e intorno a porti, aeroporti e città limitrofe è fondamentale per valutare il ruolo delle emissioni del trasporto marittimo e aereo, nonché di tutte le attività correlate, tra cui il traffico stradale e gli impianti industriali.

Uno studio dell'European Environment Agency (EEA) ha analizzato la qualità dell'aria intorno ai principali porti e aeroporti europei, confrontando i livelli di NO_2 e $PM_{2.5}$ con quelli delle regioni limitrofe. I risultati mostrano che, nel 2023, le concentrazioni medie annue di NO_2 sono risultate più elevate in tutti i porti studiati rispetto alle regioni circostanti. In particolare, nei porti del Pireo e di Napoli le concentrazioni di NO_2 hanno superato i 20 µg/m³, valore limite annuo per la tutela della salute umana, stabilito dalla Direttiva sulla qualità dell'aria ambiente (UE, 2024), da raggiungere entro il 1° gennaio 2030. Analogamente, le concentrazioni di $PM_{2.5}$ sono risultate generalmente più elevate nelle aree portuali rispetto alle regioni circostanti, sebbene le differenze fossero meno pronunciate. 13 porti su 22 presentavano concentrazioni di $PM_{2.5}$ superiori a 10 µg/m³, il valore limite annuale rivisto ai sensi della Direttiva sulla qualità dell'aria ambiente (UE, 2024). Per quanto riguarda gli aeroporti, le concentrazioni medie annue di NO_2 sono risultate più elevate in tutti gli aeroporti studiati rispetto alle aree circostanti, ad eccezione di Roma (FCO), dove le concentrazioni erano identiche, e ciò potrebbe essere paragonabile ai livelli riscontrati nelle zone residenziali ad alta densità, a causa del traffico. La concentrazione di NO_2 a Milano (LIN) era superiore a 20 µg/m³. In alcuni casi, le concentrazioni di $PM_{2.5}$ negli aeroporti erano simili a quelle delle regioni circostanti, ad esempio a Copenaghen (CPH), Roma (FCO), Amsterdam (AMS), Atene (ATH) e Berlino (BER). 6 dei 23 aeroporti presentavano concentrazioni di $PM_{2.5}$ superiori a 10 µg/m³ e quattro erano appena al di sotto di questo livello[11].

[11] *European Environment Agency, Air quality around ports and airports*.

I risultati suggeriscono che le aree portuali e aeroportuali rappresentano fonti significative di inquinamento atmosferico, soprattutto per quanto riguarda il biossido di azoto (NO_2).

Per questi settori, l'International Renewable Energy Agency (IRENA) ha individuato i seguenti cinque percorsi per portare avanti l'obiettivo della decarbonizzazione:

- riduzione della domanda e miglioramento dell'efficienza energetica: questo implica l'adozione dei principi dell'economia circolare e cambiamenti sia comportamentali che di processo con il fine di ridurre l'intensità dell'utilizzo di energia e materiali;
- utilizzo diretto di energia elettrica pulita: si basa sul passaggio da tecnologie e processi basati sui combustibili fossili ad alternative alimentate direttamente da energia elettrica pulita, tentando di aumentare contestualmente l'efficienza dei processi;
- utilizzo diretto di calore rinnovabile e biomasse: anche in questo caso l'obiettivo è quello di sostituire i combustibili fossili con alternative sostenibili, in particolare calore proveniente da tecnologie solari termiche, geotermiche o biocarburanti;
- utilizzo indiretto di energia elettrica pulita tramite combustibili e materie prime sintetiche: l'energia prodotta in modo sostenibile può essere utilizzata in modo indiretto per la sua trasformazione in combustibili sintetici o materie prime sintetiche;
- attuazione di misure di cattura, utilizzo e rimozione della CO_2: in tutti quei casi in cui non è possibile evitare la produzione di CO_2 è necessario che quest'ultima venga catturata e stoccata oppure utilizzata in modo da non essere rilasciata in atmosfera[7].

Tali percorsi si applicano ai settori aereo e marittimo, soprattutto nell'ottica dell'adozione dei carburanti sostenibili: queste alternative si prospettano essere molto promettenti per la decarbonizzazione del settore in quanto possono portare ad una maggiore sicurezza energetica e alla promozione di un'economia circolare, essendo ampiamente compatibili con gli attuali sistemi di logistica, stoccaggio e distribuzione del carburante e con i veicoli esistenti.

Per progredire nella transizione dei settori *hard-to-abate* non è però sufficiente concentrarsi in modo esclusivo sullo sviluppo tecnologico, ma si deve attuare un'innovazione sistemica: vanno regolamentati una serie di fattori, tra cui le infrastrutture fisiche e digitali, i modelli di business e le catene di approvvigionamento per alimentare una collaborazione internazionale. Inoltre, perché possa avvenire un cambiamento sostanziale, è importante rendere partecipi e interessati gli utenti stessi al tema della sostenibilità, ad esempio informandoli riguardo l'impatto ambientale prodotto dal loro viaggio al momento dell'acquisto del biglietto. Affinché i consumatori possano fare scelte consapevoli, sono necessarie informazioni più precise e affidabili, che possano anche incentivare la concorrenza tra gli operatori.

Questo è ciò che si prefigge come obiettivo l'iniziativa "Flight Emissions Label" dell'Unione Europea, secondo la quale le compagnie aeree che aderiscono volontariamente

hanno l'obbligo di comunicare i dati operativi all'EASA, che ne stima le emissioni dei voli futuri. In cambio, le compagnie aeree ricevono un'etichetta di approvazione basata su due parametri ($kgCO_2eq$ per passeggero e $kgCO_2eq$ per passeggero-chilometro). L'EASA ha inoltre il compito di creare un sito web per fornire ai passeggeri informazioni dettagliate sul programma Flight Emissions Label, come la metodologia, le ipotesi e le stime delle emissioni[12].

Tuttavia, programmi di questo tipo possono favorire comportamenti opportunistici, in particolare il fenomeno del greenwashing. Infatti, nell'aprile 2024, la Commissione europea e la Rete di Cooperazione per la Tutela dei Consumatori dell'UE hanno avviato un'indagine contro 20 compagnie aeree in merito a dichiarazioni ecologiche potenzialmente fuorvianti. Ciò ha fatto seguito a una sentenza simile emessa da un tribunale olandese, secondo cui le dichiarazioni ambientali fatte da una compagnia aerea erano fuorvianti e violavano le leggi sulla tutela dei consumatori. Questo tipo di dichiarazioni non si limita al settore dell'aviazione e la Commissione europea sta proponendo una nuova direttiva sulle dichiarazioni ecologiche per aumentare la fiducia nelle informazioni ambientali fornite dalle aziende sui loro prodotti e servizi. Recentemente, questo tipo di misura politica per aumentare la trasparenza ha registrato i più alti livelli di sostegno[12].

1.3 Principali strategie di decarbonizzazione: benefici ambientali e *trade-off*

1.3.1 Settore aeronautico

Ottimizzazione delle rotte e *Air Traffic Management* (ATM)

La necessità di ridurre le emissioni nel settore aeronautico nel breve periodo porta verso il miglioramento dei sistemi di *Air Traffic Management*. L'adozione del modello Free Route Airspace in Europa può essere un buon esempio di questa metodologia di riduzione delle emissioni[13].

Questo approccio consente agli operatori di pianificare traiettorie di volo più dirette, grazie a un maggiore coordinamento tra i responsabili della gestione dello spazio aereo. Il beneficio più rilevante da considerare di questa metodologia è un risparmio vicino al miliardo di miglia nautiche, a livello di distanze, con un taglio di 20 milioni di tonnellate di CO_2 entro il 2029[13].

Le priorità riportate nel 2025 dai gestori aeroportuali hanno avuto un focus particolare sulla gestione dei flussi tramite l'adozione di software e AI, i quali permettono di selezionare

[12] *EASA, European Aviation Environmental Report 2025 (EEA-EMSA Joint Report 15/2024).*
[13] *World Economic Forum, Global Aviation Sustainability Outlook 2025, White Paper March 2025.*

altezze e rotte per l'ottimizzazione del carburante, la riduzione delle inefficienze a terra (grazie a sistemi di gestione dei flussi dei passeggeri) e delle operazioni di terra. Queste attività permettono di ridurre l'uso di energia per impianti di climatizzazione e illuminazione e mitigare quindi gli impatti non-CO_2.

Modello *book and claim* e la gestione della catena di custodia

Il modello *book and claim* consente di sostenere l'uso di carburanti sostenibili anche se questi non vengono utilizzati direttamente sullo specifico volo operato dalla compagnia acquirente. In questo sistema, il SAF viene fisicamente immesso nella rete aeroportuale presso la località in cui è disponibile, mentre il beneficio ambientale associato viene trasferito tramite apposito certificato. La compagnia che paga il sovraprezzo per il carburante a basse emissioni rivendica la riduzione emissiva corrispondente, evitando la necessità di trasportare il SAF verso aeroporti in cui non è ancora disponibile[14].

La necessità di questo sistema nasce dal fatto che la distribuzione del SAF è troppo frammentata a livello globale e ciò impone la separazione tra l'acquisto fisico del combustibile e il trasferimento dei relativi attributi ambientali[14].

In linea con le direttive della IATA, la rendicontazione delle emissioni evitate deve basarsi sul volume o sulla massa di SAF effettivamente acquistata e immessa nel sistema dall'operatore. Questo approccio punta a garantire l'uguaglianza tra i dati e a semplificare le procedure amministrative, assicurando l'allineamento con le regolamentazioni internazionali come il sistema CORSIA dell'ICAO e il sistema di monitoraggio dell'EU ETS. La finalità è consentire alle compagnie aeree di attribuire i benefici ambientali derivanti dall'uso di carburanti sostenibili anche in contesti in cui le infrastrutture locali non garantiscono l'utilizzo diretto del SAF.

La gestione dei *feedstock*

L'aumento della biomassa disponibile è un altro argomento su cui prestare particolare attenzione, poiché è riconducibile alla costruzione di nuove fonti di approvvigionamento. Le problematiche che nascono dall'utilizzo delle materie prime biologiche sono l'eterogeneità dei rifiuti (i rifiuti urbani e agricoli sono chimicamente instabili) e lo sviluppo di processi per eliminare le impurità, i quali potrebbero danneggiare i catalizzatori nella sintesi del carburante[15]. Questo aspetto verrà poi analizzato in maniera più esaustiva nel paragrafo 1.6.

---

[14] *IATA Sustainable Aviation Fuel (SAF) Accounting & Reporting Methodology.*

[15] *ATAG, Waypoint 2050 Third edition, 2026 Report.*

Integrità ambientale e *double counting*

L'affidabilità di questo sistema viene garantita tramite la prevenzione del fenomeno di *double counting* o *double claiming* dei benefici emissivi. Il supporto della documentazione ufficiale, come ad esempio la Proof of Sustainability, per attuare la prevenzione è necessario per certificare l'idoneità del carburante agli standard dettati dagli organismi di controllo (cfr. Figura 1.9).

Il protocollo stabilisce che gli attributi ambientali non possono essere inseriti nei registri SAF senza le prove che il combustibile sia stato miscelato in un'infrastruttura comune, oppure senza evidenze della sua effettiva combustione.

Il sistema, con queste metodologie, mira a garantire che le dichiarazioni di riduzione delle emissioni non siano dovute a quantità di carburante non utilizzato o che non ci sia stata una sostituzione della stessa quantità di cherosene fossile. Le compagnie aeree sono inoltre tenute a fornire informazioni per quanto riguarda le emissioni di gas serra, potendo così evitare che le riduzioni vengano contate più volte in sistemi diversi.

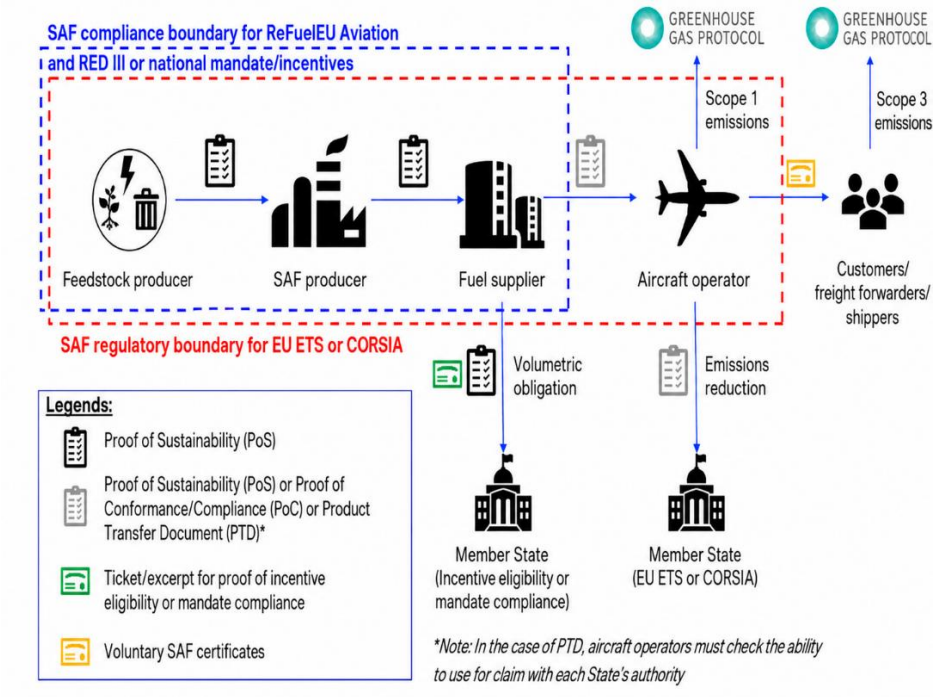


Figura 1.9: Ciclo documentazione.
Fonte: IATA Sustainable Aviation Fuel (SAF) Accounting & Reporting Methodology

Per quanto riguarda la rendicontazione, questo approccio permette di tenere traccia delle emissioni degli scope (scope 1 e 3), coerentemente con il Greenhouse Gas Protocol. Il modello *book and claim*, qualora la compagnia aerea si assuma la responsabilità per la riduzione di emissioni di scope 1 (emissioni dirette), permette di trasferire i relativi benefici dello scope 3 (emissioni indirette) agli altri elementi della catena del valore, come passeggeri o operatori logistici.

Le direttive poste dalla IATA mirano a tutelare questo meccanismo. In particolare, le regolamentazioni evidenziano che non si possono rivendicare le quote relative allo scope 3 finché le rispettive quote di scope 1 non sono state assegnate ad una compagnia. Grazie a questo sistema si evitano riduzioni non registrate e si obbliga alla registrazione del reale consumo nel settore. I registri SAF verificati assicurano, infine, la tracciabilità dei passaggi di proprietà e l'eventuale riallocazione degli attributi di scope 3, garantendo la coerenza e l'integrità delle informazioni lungo l'intero processo, dall'acquisto fino alla rendicontazione finale[14] (cfr. Figura 1.10).

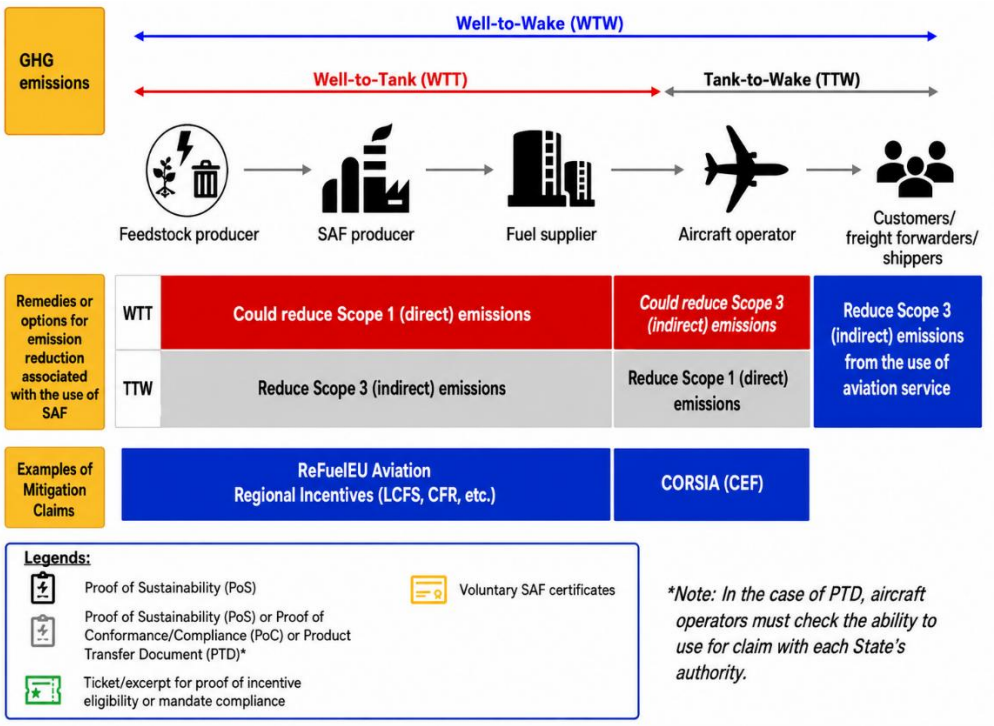


Figura 1.10: Riduzione delle emissioni dello scope 1 e 3.
Fonte: IATA Sustainable Aviation Fuel (SAF) Accounting & Reporting Methodology

1.3.2 Settore marittimo

Il settore marittimo presenta diverse difficoltà per quanto concerne la sua decarbonizzazione. In particolare, per le navi di grandi dimensioni, tali impedimenti sono dovuti sia agli elevati costi per l'abbattimento delle emissioni, sia alla distribuzione disomogenea e alla limitata adeguatezza delle infrastrutture di rifornimento a livello globale. Le spese per l'acquisto di combustibili o degli asset necessari sono a carico delle compagnie marittime e questo può compromettere la loro competitività nel settore. La strategia proposta per ovviare a queste problematiche è basata sulla collaborazione tra gli attori del settore e

sull'ulteriore supporto di un sistema contabile che permetta la suddivisione dei costi e la corretta attribuzione degli attributi ambientali[16].

Modello *book and claim*

Il modello *book and claim*, come nel caso del settore aeronautico, garantisce la flessibilità necessaria anche dove la presenza di infrastrutture *green* scarseggia. Le caratteristiche ambientali del carburante vengono separate dall'effettivo prodotto e registrate in appositi cataloghi, consentendo di rivendicare le riduzioni delle emissioni anche in assenza di un impiego diretto del carburante nel trasporto considerato, superando il limite della carenza di infrastrutture per il rifornimento di carburanti sostenibili.

Generazione dei servizi di trasporto a basse emissioni (LETS)

L'approccio LETS, Low Emission Transportation Services, permette la creazione di servizi di due tipologie. Il primo riguarda la generazione diretta, la quale avviene quando una compagnia navale utilizza soluzioni a basse emissioni nella propria flotta (cfr. Figura 1.11).

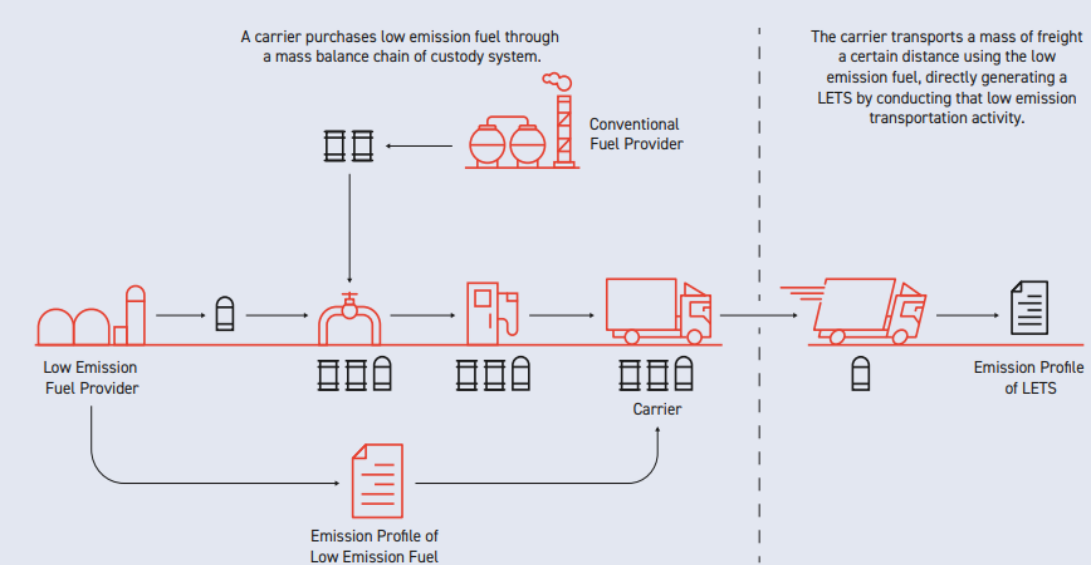


Figura 1.11: Generazione diretta.
Fonte: Voluntary Market Based Measures Framework for Logistics Emissions Accounting and Reporting 2023

La seconda tipologia riguarda invece la generazione indiretta, la quale avviene quando vengono acquistati gli attributi ambientali di una soluzione sostenibile da un altro fornitore.

[16] *Smart Freight Centre, Voluntary Market Based Measures Framework for Logistics Emissions Accounting and Reporting.*

In questo caso, l'impatto ambientale dovuto al trasporto viene registrato come se fosse riconducibile a tecnologie sostenibili, indipendentemente dall'effettivo consumo di carburante da parte dei vettori coinvolti (cfr. Figura 1.12).

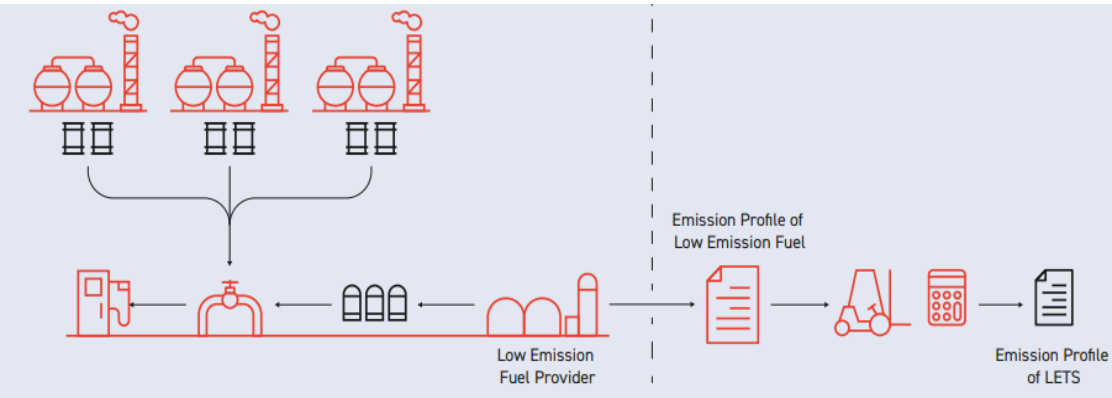


Figura 1.12: Generazione indiretta.
Fonte: Voluntary Market Based Measures Framework for Logistics Emissions Accounting and Reporting 2023

Per garantire l'efficacia della strategia descritta, si deve rispettare il concetto di addizionalità. Un servizio LETS deve puntare ad un obiettivo di decarbonizzazione superiore a quanto già richiesto dalle normative in atto.

A titolo esemplificativo, l'impiego di biocarburanti per soddisfare i requisiti di intensità carbonica previsti dall'Annex VI della convenzione MARPOL dell'IMO non può essere considerato addizionale qualora esista già un meccanismo regolatorio che tenga conto del contributo agli obiettivi obbligatori[17].

Il profilo emissivo dei LETS, secondo il vincolo modale imposto, è correlato al modo di trasporto effettuato: così facendo, le riduzioni ottenute nel trasporto marittimo non possono essere utilizzate per compensare le emissioni derivanti da altri settori, come quello aeronautico[16].

Contabilità delle emissioni e prevenzione del *double counting*

Analogamente a quanto riportato per il settore dell'aviazione, l'integrità del sistema viene mantenuta se viene evitato il fenomeno di *double counting*, ossia il conteggio della stessa riduzione di emissioni più volte. Le emissioni del vettore e quelle della catena di fornitura, anche se registrate separatamente, si riferiscono alla stessa attività di trasporto e quindi non

[17] *International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL), Annex VI – Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ships.*

possono essere sommate come se fossero indipendenti, perché si rischierebbe di contabilizzare riduzioni superiori a quelle effettivamente generate. I fornitori possono mettere a disposizione certificati di tipo *bundled*, che includono sia il profilo dell'emettitore sia quello della catena logistica, oppure *unbundled*, consentendo una gestione più precisa dei diritti di contabilizzazione delle riduzioni di CO_2 nei rispettivi inventari aziendali.

Sistemi di *Onboard Carbon Capture* (OCC)

La tecnologia di *Onboard Carbon Capture* è una delle soluzioni più promettenti e importanti per le navi petroliere e portacontainer. Nonostante le sfide di natura ingegneristica legate agli spazi, infatti, i serbatoi per la CO_2 liquefatta richiedono ampi volumi, simili a quelli per il GNL.

L'installazione di sistemi OCC, oltre a richiedere spazio, necessita di una capacità energetica aggiuntiva (circa il 30%) per l'alimentazione dei processi per la cattura e la successiva liquefazione del gas[18].

La sfida non si limita al contesto navale, ma riguarda anche il livello delle infrastrutture portuali, poiché l'efficacia degli OCC è correlata alla possibilità di scaricare CO_2 nei porti. Se realizzabile, tale scenario potrebbe ridurre di circa il 9% le emissioni della flotta mondiale (cfr. Figura 1.13), ma richiederebbe uno sviluppo coordinato tra tecnologia navale e logistica portuale[18].

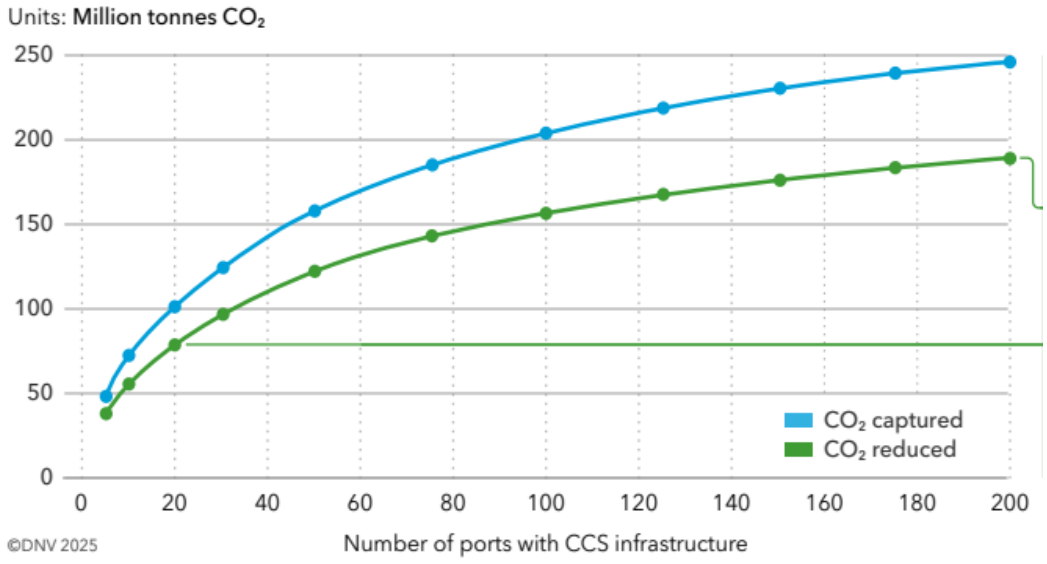


Figura 1.13: Cattura del carbonio a bordo (OCC) applicata alle grandi navi in relazione al numero di porti dotati di infrastrutture per lo scarico della CO_2.
Fonte: DNV, Maritime Forecast to 2050, 2025

[18] *DNV (2025), Maritime Forecast to 2050.*

Just-In-Time (JIT) Arrival

Il processo di scalo portuale segue attualmente la logica dell'*hurry-up-and-wait*, cioè navigare a massima velocità per poi sostare a lungo per l'inadeguato allestimento della banchina, non ottimizzando le prestazioni emissive ed economiche.

Il metodo JIT mira a ridurre questa inefficienza, permettendo al comandante di regolare la velocità sulla base dell'effettiva finestra di attracco[19].

L'ottimizzazione portata dal JIT richiede però il costante scambio di dati tra la nave e terra, in particolar modo il timestamp relativo al tempo di arrivo richiesto. La metodologia attuale porta le navi ad attendere circa il 10% del tempo ferme all'ancora e la soluzione JIT punta ad eliminare proprio questo fattore. Tuttavia, questa è una soluzione che va considerata anticipatamente all'introduzione dei carburanti sostenibili, in quanto non si conoscono ancora i limiti strutturali che dovrebbero avere i motori che supportano tecnologie green[19].

1.4 Carburanti sostenibili per aviazione e trasporto marittimo: definizione, caratteristiche e classificazione

Nel contesto della transizione energetica del trasporto aereo e marittimo, i carburanti sostenibili giocano un ruolo fondamentale in quanto rappresentano la soluzione principale per ridurre le emissioni nel breve e medio periodo. Infatti, essendo per lo più compatibili con le infrastrutture esistenti, consentirebbero di mantenere la continuità del servizio. Tuttavia, è necessario distinguere in modo chiaro le differenti soluzioni adottate in questi due settori, poiché presentano differenze rilevanti sia sul piano tecnologico che su quello regolatorio[20] [21] [22].

1.4.1 I carburanti sostenibili per l'aviazione: i SAF

Per quanto riguarda il settore dell'aviazione, i carburanti sostenibili sono generalmente noti come Sustainable Aviation Fuels (SAF). Nonostante la diffusione del termine, una definizione univoca e armonizzata di SAF non è disponibile poiché varia in funzione del quadro tecnico e normativo considerato[23].

---

[19] *GreenVoyage 2050, JUST IN TIME ARRIVAL GUIDE, Barriers and Potential Solutions.*

[20] *Eni, Assarmatori e Confitarma, La rotta verso il net zero, 2024.*

[21] *A. Raihan, Sustainable aviation: A critical review of policies, technologies, and future pathways. Journal of the Air Transport Research Society, 2025.*

[22] *ICAO, Resolution A41-21, 2022.*

[23] *Regolamento (UE) 2023/2405, del 18 ottobre 2023, c.d. ReFuelEU Aviation, in GUUE, 2023.*

Nel contesto europeo, la definizione e la classificazione dei SAF si fondano principalmente sull'interazione tra la direttiva sulle energie rinnovabili, nella sua versione rifusa e successivamente modificata (direttiva (UE) 2018/2001, RED II, come modificata dalla direttiva (UE) 2023/2413, RED III[24]), e il regolamento ReFuelEU Aviation Regulation (EU) 2023/2405[23].

Tali fonti consentono di individuare quali categorie di carburanti rientrino, di volta in volta, nella nozione di SAF; la loro analisi giuridica dettagliata sarà condotta nel paragrafo 2.3.

A livello internazionale, il principale riferimento regolatorio è rappresentato da CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation), sviluppato in ambito ICAO[22]. Il richiamo è utile non per anticipare l'analisi della governance internazionale, che sarà svolta nel Capitolo 2, bensì per evidenziare che la classificazione dei carburanti aeronautici sostenibili non è uniforme neppure sul piano internazionale.

In tal senso, nell'ambito europeo, la qualificazione dei SAF non dipende esclusivamente dal processo produttivo o dalla natura del *feedstock* utilizzato, ma anche dal rispetto dei criteri di sostenibilità e dal conseguimento di specifiche prestazioni emissive valutate secondo metodologie di Life Cycle Assessment. Un'impostazione simile si riscontra anche nel quadro CORSIA, dove la qualifica dei carburanti è a sua volta collegata sia all'origine del combustibile sia alla verifica delle prestazioni emissive sul ciclo di vita.

Il quadro normativo definisce la sostenibilità di un carburante sotto il profilo ambientale; la sua idoneità all'impiego nel trasporto aereo è invece regolata dagli standard tecnici di settore. In questo ambito, un ruolo centrale è svolto da ASTM International, organizzazione di riferimento per la standardizzazione dei carburanti aeronautici.

Dal punto di vista tecnico, i nuovi carburanti aeronautici sono anzitutto sottoposti al processo di valutazione previsto dalla ASTM D4054[25]; una volta approvati, essi possono essere inclusi nella ASTM D7566, che ne stabilisce i requisiti tecnici di impiego (cfr. Figura 1.14).

[24] *Direttiva (UE) 2023/2413, del 18 ottobre 2023, in GUUE, 2023.*

[25] *ASTM D4054-25a: Standard practice for evaluation of new aviation turbine fuels and fuel additives.*

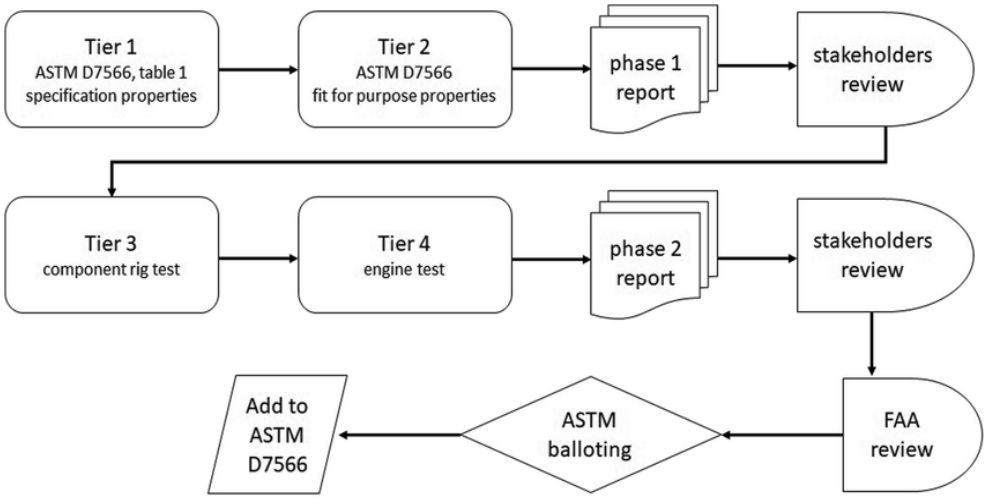


Figura 1.14: Processo di valutazione dei carburanti aeronautici secondo ASTM D4054.
Fonte: R. C. Boehm, J. G. Colborn e J. S. Heyne, Comparing Alternative Jet fuel Dependencies Between Combustors of Different Size and Mixing Approaches, Frontiers in Energy Research

In particolare, la ASTM D7566 definisce i requisiti minimi applicabili ai carburanti per turbine aeronautiche contenenti idrocarburi sintetici e disciplina il componente sintetico di miscelazione, specificandone i *feedstock* ammissibili, i percorsi di conversione autorizzati e le proprietà richieste ai fini della conformità[26].

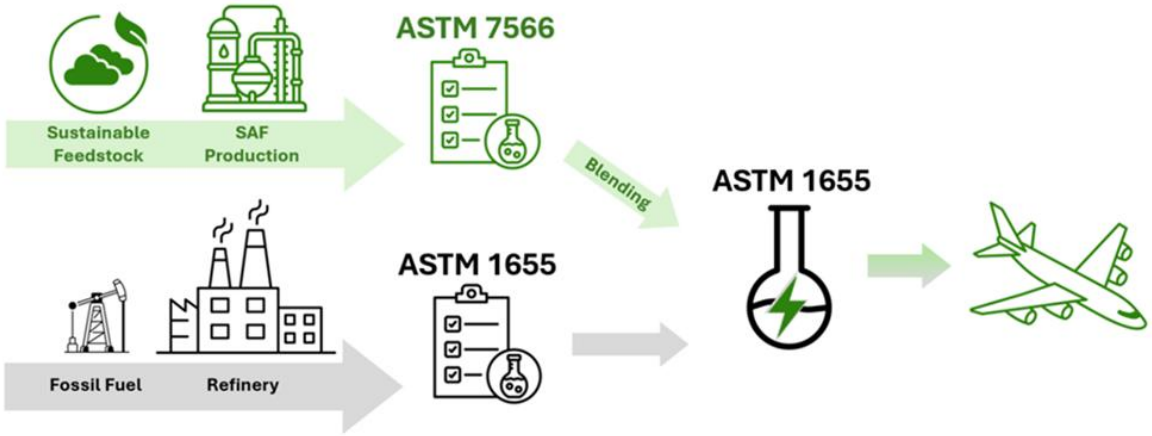


Figura 1.15: Schema del percorso di qualificazione e utilizzo dei SAF.
Fonte: J. Castrodale, The Sustainable Aviation Fuel (SAF) Solution Framework, Climate Drift, 2024

Una volta prodotto in conformità alla ASTM D7566, il componente sintetico deve essere miscelato con carburante convenzionale entro i limiti consentiti per lo specifico percorso produttivo. A seguito della miscelazione e della verifica del rispetto dei requisiti finali di

[26] *ASTM D7566-25a: Standard specification for aviation turbine fuel containing synthesized hydrocarbons.*

prestazione, il prodotto ottenuto può essere trattato come carburante per turbine conforme alla ASTM D1655[27] e utilizzato nel settore aeronautico[28] (cfr. Figura 1.15).

È opportuno precisare che, in accordo con quanto detto in precedenza, il rispetto della specifica ASTM D7566 costituisce una condizione di idoneità tecnica, ma non è sufficiente a qualificare un carburante come SAF in senso regolatorio, poiché tale qualificazione richiede anche il rispetto dei criteri di sostenibilità previsti dal quadro normativo di riferimento, che sarà approfondito nel Capitolo 2.

I SAF sono quindi classificabili come *drop-in fuels*, ossia carburanti utilizzabili nelle infrastrutture e nei motori esistenti senza necessità di modifiche sostanziali[29]. Questa caratteristica spiega perché essi rappresentino oggi la principale opzione di decarbonizzazione dell'aviazione nel breve e medio periodo. Il loro impiego resta però soggetto ai già citati limiti di miscelazione, differenti in funzione del percorso produttivo approvato. I vari *pathways* produttivi saranno approfonditi nel paragrafo 1.5, mentre le criticità in relazione alla realizzazione di questi carburanti sostenibili saranno esaminate nel paragrafo 1.7.

La sicurezza dei motori degli aerei attuali dipende dagli idrocarburi aromatici, essenziali per il corretto rigonfiamento degli elastomeri nelle guarnizioni. Questi composti, che nel cherosene possono rappresentare fino al 25% del loro volume, hanno la funzione di garantire l'integrità delle guarnizioni elastomeriche nei propulsori degli aeromobili in flotta[30].

Il ritardo nella certificazione dei nuovi modelli di aerei, che ridurrebbero la necessità di utilizzare carburanti *drop-in*, rallenta il rinnovo della flotta attuale. In questo contesto, diventa necessario prolungare la vita utile degli aeromobili esistenti e ricorrere a interventi di *retrofitting*, con conseguenti costi aggiuntivi per adeguare le infrastrutture agli standard più recenti. La transizione energetica basata sui SAF, mantenendo la logica del *drop-in*, assume un ruolo molto importante in questo scenario in cui, secondo lo studio della IATA, la ripresa dei cicli di rinnovo delle flotte non è prevista prima del periodo 2031-2034[31].

1.4.2 I carburanti sostenibili per il trasporto marittimo

Nel settore marittimo, il concetto di carburante sostenibile assume un significato più ampio e meno standardizzato rispetto a quanto avviene nell'aviazione. Ciò riflette la maggiore

[27] *ASTM D1655-25a: Standard specification for aviation turbine fuels, 2025.*
[28] *ICAO New Sustainable Aviation Fuels (SAF) technology pathways under development.*
[29] *ECAC guidance on sustainable aviation fuels (SAF), 2023.*
[30] *ATI, SAF Integration Report.*
[31] *IATA, Global Outlook for Air Transport Trade, AI, and the energy transition, 2025.*

varietà delle tipologie di nave, dei profili di missione, delle configurazioni propulsive e delle condizioni operative che caratterizzano il trasporto via mare[18] [20].

Sotto il profilo classificatorio, i combustibili sostenibili per il trasporto marittimo possono essere distinti in tre gruppi principali.

Un primo gruppo è costituito dai biocarburanti liquidi e gassosi, tra cui HVO, FAME e bioLNG, che appaiono particolarmente rilevanti nel breve periodo in ragione della loro maggiore compatibilità con la flotta e con le infrastrutture esistenti, anche nella logica di miscelazione con i combustibili convenzionali[20].

Un secondo gruppo comprende i combustibili di transizione, tra cui l'LNG fossile, che non rappresenta una soluzione a zero emissioni ma può contribuire, in determinate condizioni, alla riduzione di alcune emissioni rispetto ai combustibili marini convenzionali. La sua rilevanza è legata anche allo sviluppo infrastrutturale già avviato e alla possibilità di progressiva integrazione con quote di bioLNG, il quale può offrire benefici emissivi più elevati lungo il ciclo di vita[20].

Un terzo gruppo è infine rappresentato dai combustibili a basse o nulle emissioni carboniche di più lungo periodo, tra cui metanolo, ammoniaca, idrogeno ed *e-fuels*, la cui diffusione appare tuttora subordinata alla maturazione tecnologica, alla disponibilità di filiere produttive sostenibili e alla realizzazione delle necessarie infrastrutture di bunkeraggio[18]. In questa prospettiva, la classificazione dei combustibili sostenibili nel settore marittimo risponde a una logica di neutralità tecnologica, ossia al principio secondo cui non viene privilegiata una singola soluzione energetica[20]. La decarbonizzazione del trasporto marittimo, come difatti evidenziato, non appare destinata a fondarsi su un unico carburante dominante, ma su una pluralità di opzioni, differenti per caratteristiche tecniche, grado di maturità e ambiti di applicazione[20].

Un elemento di differenziazione particolarmente rilevante rispetto al settore aeronautico riguarda il rapporto tra combustibile e tecnologie di bordo. Se nell'aviazione i SAF sono concepiti prevalentemente secondo una logica *drop-in*, nel trasporto marittimo solo una parte dei combustibili sostenibili presenta analoghi livelli di compatibilità con la flotta esistente. Molte delle opzioni oggi considerate più promettenti richiedono nuovi sistemi di stoccaggio, adeguamenti dei motori o configurazioni *dual-fuel* e *fuel-ready*. Per *dual-fuel* si intendono unità in grado di operare sin da subito con due combustibili differenti, generalmente uno convenzionale e uno alternativo[32]; per *fuel-ready* si intendono invece unità progettate con predisposizioni tecniche che ne consentano la successiva conversione all'impiego di un diverso vettore energetico[18]. Ne consegue che, nel settore marittimo, la classificazione dei combustibili sostenibili non dipende soltanto dall'origine del vettore

---

[32] *IMO, Resolution MSC.391(95), "Adoption of the International Code of Safety for Ships Using Gases or Other Low-Flashpoint Fuels", 2015.*

energetico, ma anche dal loro grado di compatibilità con la flotta esistente e con le tecnologie di bordo.

Sul piano regolatorio, il quadro europeo non individua i carburanti sostenibili per uso marittimo mediante un'unica categoria, ma li qualifica in funzione delle emissioni e della conformità ai criteri di sostenibilità applicabili. In particolare, il regolamento FuelEU Maritime opera attraverso un limite progressivamente decrescente all'intensità dei gas a effetto serra dell'energia utilizzata a bordo[33], mentre la RED III individua, tra le categorie rilevanti per il settore marittimo, i biocarburanti avanzati e i combustibili rinnovabili di origine non biologica, ossia gli RFNBO[24]. Il richiamo a tali categorie è funzionale soltanto alla classificazione dei combustibili sostenibili, mentre l'analisi della disciplina europea del settore marittimo sarà sviluppata nel paragrafo 2.3.

Nel contesto europeo, possono essere riconosciuti come combustibili marittimi sostenibili:

- i biocarburanti certificati ai sensi della RED, purché ottenuti da *feedstock* ammissibili e in grado di garantire una significativa riduzione delle emissioni rispetto ai combustibili fossili;
- i RFNBO;
- i combustibili a bassa intensità carbonica, nella misura in cui risultino conformi ai criteri emissivi richiesti.

In questa prospettiva, la valutazione dei combustibili marittimi sostenibili non può essere limitata alle sole emissioni prodotte in fase d'uso, ma deve essere ricondotta a un approccio di tipo *Well-to-Wake*, che consideri l'intero ciclo emissivo, dalla produzione del combustibile al consumo finale a bordo[18].

I biofuels, in tale quadro, risultano tra i combustibili più immediatamente utilizzabili, soprattutto quando compatibili con la flotta e le infrastrutture esistenti[20]. Gli RFNBO assumono invece rilievo in quanto collegano la decarbonizzazione del trasporto marittimo all'impiego di energia rinnovabile nella produzione del combustibile; per tale ragione, FuelEU Maritime ne incentiva l'impiego anche mediante un meccanismo di computo favorevole[33].

Sul piano internazionale, infine, la IMO 2023 Strategy collega la decarbonizzazione del settore marittimo a una combinazione di misure tra cui, da un lato il miglioramento dell'efficienza energetica e della prestazione emissiva del trasporto marittimo, dall'altro la progressiva adozione di combustibili alternativi a zero o quasi zero emissioni[34].

Il concetto di carburante sostenibile nell'aviazione tende a concentrarsi nella categoria dei SAF, pur con differenze legate ai diversi quadri tecnico-regolatori. Nel settore marittimo, invece, esso assume una configurazione più ampia e articolata, comprendendo più soluzioni

---

[33] Regolamento (UE) 2023/1805, del 13 settembre 2023, c.d. FuelEU Maritime, in GUUE, 2023.

[34] IMO, Strategy on reduction of GHG emissions from ships, 2023.

energetiche alternative, differenziate per grado di maturità tecnologica, compatibilità con la flotta esistente, requisiti infrastrutturali e capacità di ridurre l'intensità emissiva lungo il ciclo di vita. Tale eterogeneità rende necessario, nel paragrafo seguente, approfondire le diverse filiere produttive e i relativi percorsi di qualificazione ambientale.

1.5 Percorsi e tecnologie produttive dei carburanti sostenibili

1.5.1 Settore aeronautico

La transizione energetica verso carburanti sostenibili per il settore aeroportuale dipende dai diversi percorsi e tecnologie di produzione in grado di unire sostenibilità ambientale, affidabilità tecnica e scalabilità industriale[35]. L'analisi di tali variabili consente di comprendere il modo in cui si ottengono i diversi carburanti, analizzando le differenze tra le diverse filiere produttive disponibili e in fase di sviluppo.

Nel settore dell'aviazione, il quadro tecnologico è condizionato dalla necessità di produrre combustibili liquidi idonei all'impiego in turbine aeronautiche, caratterizzati da stringenti requisiti di sicurezza. Proprio tali problematiche legate alla sicurezza e le particolari condizioni di impiego presenti nel settore dell'aviazione, assieme ad altre ragioni connesse alla natura del combustibile per aviazione, determinano una selezione più restrittiva dei processi e delle materie prime effettivamente qualificabili[28]. In questo contesto, i carburanti *drop-in* come i SAF possono essere prodotti a partire da fonti di carbonio rinnovabili o da rifiuti, nonché, nei percorsi *Power-to-Liquid*, dalla combinazione di CO_2 e idrogeno prodotto mediante energia rinnovabile[29]. Le principali basi di approvvigionamento considerate includono biomasse, residui e rifiuti, nonché elettricità da fonti rinnovabili, in particolare per la produzione di idrogeno destinato ai combustibili sintetici[29].

Secondo la documentazione istituzionale ICAO[36] disponibile attualmente, i percorsi di conversione approvati sono undici, articolati tra Annex della ASTM D7566 e percorsi di *co-processing* disciplinati dalla ASTM D1655 Annex A1, come riportato nella Tabella 1.1.

[35] *ICAO, Long term global aspirational goal (LTAG) for international aviation.*
[36] *ICAO, SAF conversion processes.*

ASTM di riferimento	Processo di conversione	Sigla	*Feedstock* possibili	*Max blend ratio*
ASTM D7566 Annex A1	Cherosene paraffinico sintetico idroprocessato mediante Fischer-Tropsch	FT	Carbone, gas naturale, biomassa	50%
ASTM D7566 Annex A2	Cherosene paraffinico sintetico da esteri e acidi grassi idroprocessati	HEFA	Oli vegetali, grassi animali, oli da cucina esausti	50%
ASTM D7566 Annex A3	Iso-paraffine sintetiche da zuccheri fermentati e idroprocessati	SIP	Biomassa utilizzata per la produzione di zuccheri	10%
ASTM D7566 Annex A4	Cherosene sintetico con aromatici derivati dall'alchilazione di aromatici leggeri da fonti non petrolifere	FT-SKA	Carbone, gas naturale, biomassa	50%
ASTM D7566 Annex A5	Cherosene paraffinico sintetico da alcoli	ATJ-SPK	Etanolo, isobutanolo e isobutene da biomassa	50%
ASTM D7566 Annex A6	Carburante jet prodotto mediante idrotermolisi catalitica	CHJ	Oli vegetali, grassi animali, oli da cucina esausti	50%
ASTM D7566 Annex A7	Cherosene paraffinico sintetico da esteri e acidi grassi idroprocessati in idrocarburi	HC-HEFA-SPK	Alghe	10%
ASTM D7566 Annex A8	Cherosene paraffinico sintetico con aromatici	ATJ-SKA	Alcoli C2-C5 da biomassa	/
ASTM D1655 Annex A1	Co-idroprocessamento di esteri e acidi grassi in una raffineria petrolifera convenzionale	/	Oli vegetali, grassi animali e oli da cucina esausti di origine biogenica co-processati con petrolio	5%
ASTM D1655 Annex A1	Co-idroprocessamento di idrocarburi Fischer-Tropsch in una raffineria petrolifera convenzionale	/	Idrocarburi Fischer-Tropsch co-processati con petrolio	5%
ASTM D1655 Annex A1	Co-processamento di HEFA	/	Esteri e acidi grassi idroprocessati da biomassa	10%

Tabella 1.1: Processi di conversione SAF approvati secondo le specifiche ASTM D7566 e ASTM D1655.
Fonte: SAF conversion processes, International Civil Aviation Organization

Tra i percorsi approvati, come citato, alcuni prevedono il *co-processing*, ossia la lavorazione congiunta di *feedstock* rinnovabili e fossili all'interno di raffinerie convenzionali[29]. Tale approccio consente una più rapida implementazione, poiché sfrutta infrastrutture e capacità di raffinazione già disponibili; tuttavia, presenta limiti in termini di quota rinnovabile

incorporabile nel prodotto finale, poiché i percorsi di *co-processing* ammessi in ASTM D1655 Annex A1 prevedono percentuali inferiori rispetto ai limiti di miscelazione consentiti per diversi *pathway* ASTM D7566[37].

Accanto ai percorsi già approvati, numerosi processi di conversione per la produzione di SAF sono attualmente in fase di valutazione da parte di ASTM International (Tabella 1.2). Tali attività rientrano in un contesto di continua evoluzione tecnologica volto ad ampliare le opzioni disponibili, ridurre i costi e diversificare le materie prime utilizzabili[28].

Processo di conversione	Sigla	Sviluppatori principali
Cherosene aromatico sintetizzato	SAK	Virent
Idropirolisi e idroconversione integrate	IH2	Shell
HEFA a singolo reattore (Drop-in Liquid Sustainable Aviation and Automotive Fuel)	DILSAAF	Indian CSIR-IIP
Pirolisi di plastiche non riciclabili	ReOIL	OMV
Co-processamento di olio di pirolisi da pneumatici usati	TPO	Phillips 66
Da metanolo a *Jet fuel*	MTJ	ExxonMobil
Incremento del co-processamento di acidi grassi/esteri dal 5% al 30%	/	/
HEFA con maggiore contenuto di cicloparaffine	/	Revo
Pirolisi della biomassa	/	Alder
Pirolisi di biomassa/rifiuti	/	Green Lizard
Cicloalcani da etanolo	/	Vertimass

Tabella 1.2: Processi di conversione dei SAF in fase di valutazione.
Fonte: SAF conversion processes, International Civil Aviation Organization

Le tecnologie riportate comprendono anche quelle in recente evoluzione e non ancora in fase di utilizzo. Per questo motivo, la trattazione successiva si focalizzerà sui percorsi con la maturità tecnologica più rilevante. La scelta di trattare solo le tecnologie con TRL più significativo è dovuta alla necessità di analizzare le soluzioni in grado di garantire volumi significativi, distinguendole così dai processi ancora in fase sperimentale o di sviluppo.

[37] *ICAO, Co-processing and revamping: How to use existing refineries to produce SAF, 2024.*

HEFA (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids)

Tra i diversi *pathways* produttivi, l'HEFA rappresenta il processo più maturo, sia da un punto di vista tecnico che commerciale. Tale processo è stato approvato nel 2011 con il limite del 50% di blend ratio e rappresenta attualmente la tecnologia maggiormente utilizzata per la produzione di combustibili alternativi per l'aviazione. Materie prime lipidiche, come oli vegetali puri o di recupero, sono convertite mediante l'uso di significative quantità di idrogeno, in un prodotto chiamato HVO (o anche Green Diesel), che può essere ulteriormente isomerizzato e separato dalla frazione-gasolio al fine di essere utilizzabile in turbine aeronautiche.

Il processo di idrogenazione (cfr. Figura 1.16), che costituisce il cuore della tecnologia per la produzione di HEFA, è derivato da tecnologie esistenti ed ampiamente utilizzate nelle tradizionali raffinerie. Lo scopo principale dell'idrogenazione è quello di de-ossigenare la molecola, rimuovendone al contempo elementi indesiderati quali azoto, zolfo e metalli, oltre a rompere le molecole di eccessiva lunghezza, procedendo quindi ad una seconda fase di isomerizzazione, finalizzata al miglioramento del comportamento alle basse temperature del combustibile.

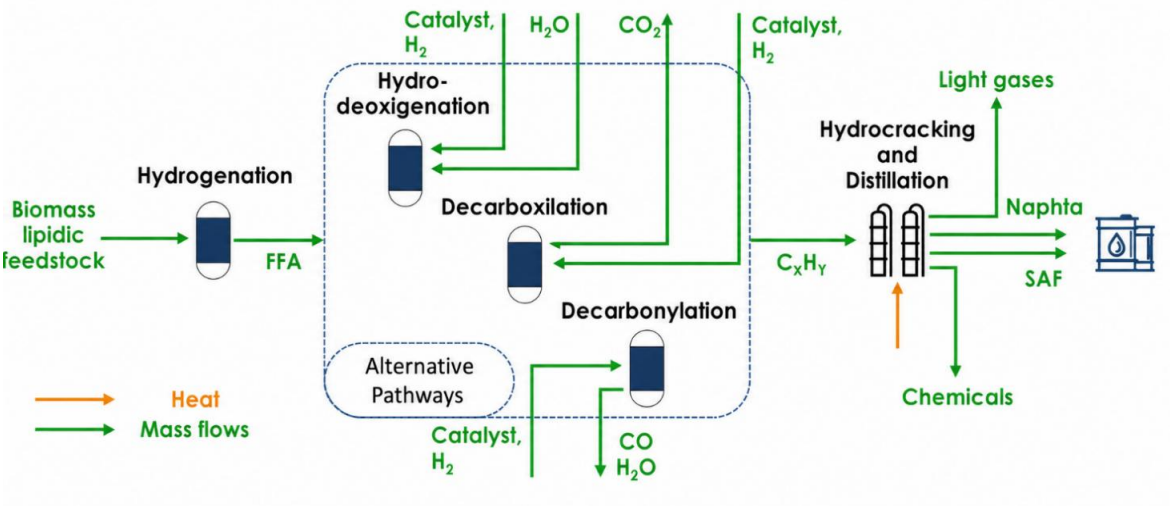


Figura 1.16: Principali fasi del processo HEFA.
Fonte: CORSIA, The first internationally adopted approach to calculate life cycle GHG emissions for aviation fuels 2021

Il cherosene alternativo prodotto dal processo HEFA risulta di eccellente qualità, ma privo della quota di aromatici richiesta dallo standard ASTM per il Jet-A1. Per tale ragione, esso non coincide con un carburante per turbine pienamente conforme nella sua forma pura, ma viene normalmente qualificato come *blending component*. Solo a seguito della miscelazione con cherosene fossile, entro i limiti consentiti e previa verifica della conformità del prodotto finale ai requisiti tecnici applicabili, esso può essere utilizzato come carburante aeronautico. In pratica, il limite legato alla carenza di aromatici viene superato miscelando il jet alternativo da HEFA.

La centralità del percorso HEFA deriva dalla sua relativamente elevata maturità industriale e dalla possibilità di sfruttare conoscenze e configurazioni impiantistiche già sviluppate nel settore della raffinazione convenzionale e della produzione di HVO. Non sorprende che la maggior parte della produzione attuale di SAF e gran parte delle capacità annunciate a livello europeo continui a essere riconducibile a questa filiera, almeno nel breve e medio periodo. In una configurazione industriale oggi tipica, nella quale gli impianti risultano prevalentemente orientati alla produzione di carburanti rinnovabili per il trasporto stradale, la quota di biocarburante per l'aviazione certificabile secondo gli standard ASTM si attesta intorno al 15% in volume dell'output complessivo. Ciò significa che, nell'assetto produttivo attualmente più diffuso, il SAF costituisce solo una parte del mix di prodotti ottenuti dalla raffineria, mentre il resto è rappresentato principalmente da altri distillati intermedi. Diversamente, in configurazioni produttive specificamente orientate a massimizzare la resa della frazione aeronautica, la quota di prodotto destinabile al settore aeronautico può aumentare in modo significativo. In base ad alcune stime, il rendimento massimo del processo HEFA può raggiungere circa il 55-60% dell'output totale della raffineria. Il dato va quindi inteso come espressione di un potenziale tecnico-produttivo conseguibile in assetti ottimizzati, distinto dalla configurazione industriale tipica oggi prevalente[38].

FT-SPK (Fischer-Tropsch Synthesized Paraffinic Kerosene)

Diverso è il caso del processo Fischer-Tropsch, dove biomasse lignocellulosiche, residui forestali o frazioni non riciclabili dei rifiuti solidi urbani, vengono dapprima convertiti in *syngas* e successivamente trasformati, attraverso la sintesi catalitica, in idrocarburi liquidi (cfr. Figura 1.17).

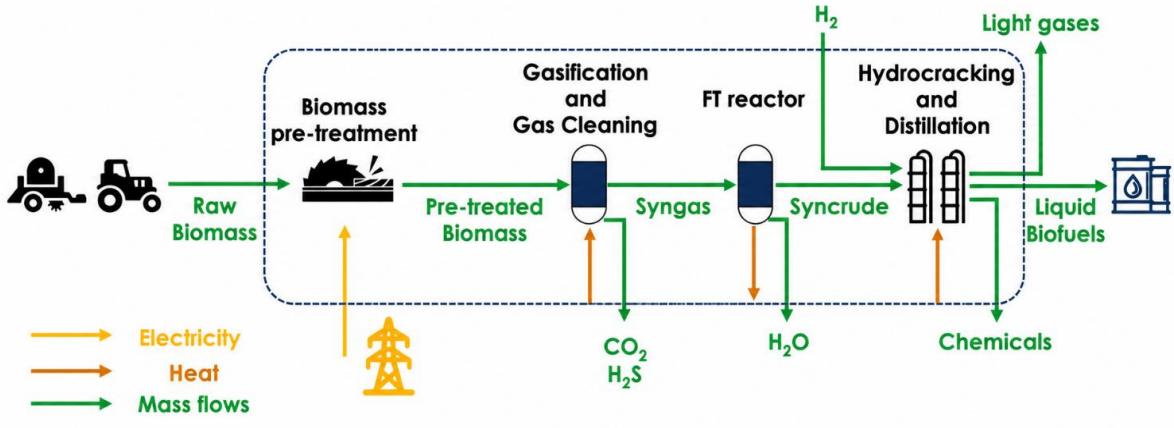


Figura 1.17: Schema di produzione di prodotti FT da biomasse.
Fonte: CORSIA: The first internationally adopted approach to calculate life-cycle GHG emissions for aviation fuels

[38] *IEA Bioenergy, Progress in Commercialization of Biojet/Sustainable Aviation Fuels (SAF).*

L'Annex A1 della ASTM D7566 definisce il FT-SPK come un combustibile paraffinico ad elevata purezza ma privo di aromatici, il cui utilizzo è limitato alla miscelazione (fino al 50%) con Jet A-1 per garantire la compatibilità con i materiali degli aeromobili. Per superare tale limite, l'Annex A4 introduce il FT-SPK/A, che prevede l'integrazione di una frazione aromatica nel prodotto finale, rendendolo più conforme alle specifiche convenzionali. Dal punto di vista ambientale, questi combustibili contribuiscono alla riduzione delle emissioni nel quadro del programma CORSIA promosso da International Civil Aviation Organization. Tuttavia, nonostante la precoce certificazione, la diffusione industriale del processo FT risulta ancora limitata a causa degli elevati costi di investimento e gestione, soprattutto nel caso di impianti alimentati a biomassa.

ATJ-SPK (Alcohol-to-Jet- Synthetic Paraffinic Kerosene)

Un ulteriore *pathway* è rappresentato dal processo ATJ-SPK, approvato nel 2016 con un limite di miscelazione del 50%. Il processo prevede la conversione di alcoli, in particolare etanolo o isobutanolo, in combustibili paraffinici idonei all'impiego aeronautico. Inizialmente vi è una fase di pretrattamento e rettifica dell'alcol, seguita dalle successive fasi di deidratazione, oligomerizzazione e hydroprocessing (cfr. Figura 1.18).

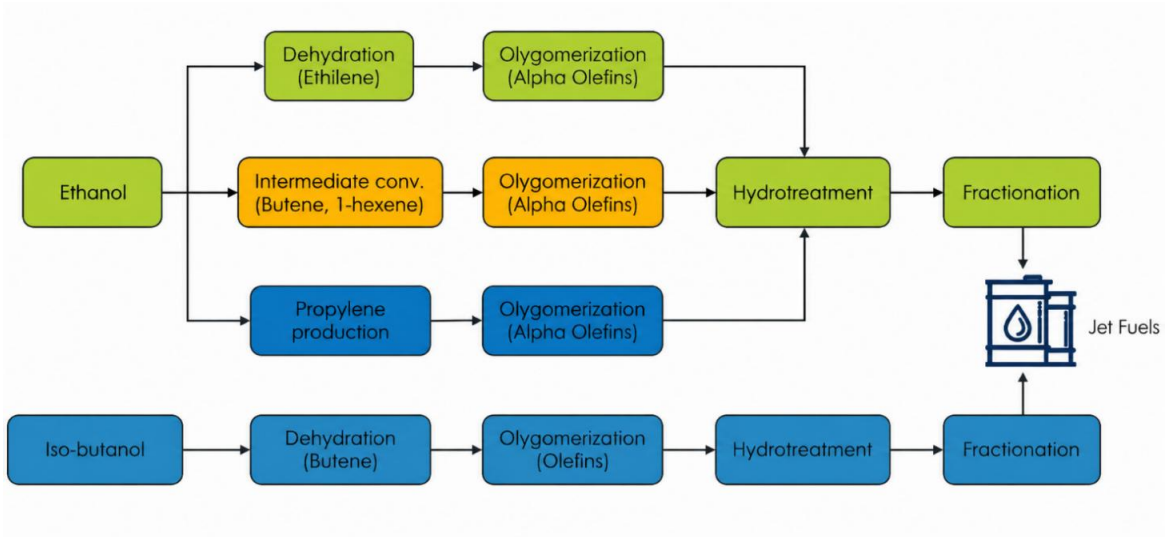


Figura 1.18: Schema delle fasi del processo ATJ.
Fonte: CORSIA Eligible Fuels – Life Cycle Assessment Methodology (Version 6), International Civil Aviation Organization

L'interesse per questa filiera dipende dalla possibilità di produrre gli alcoli intermedi a partire da un'ampia varietà di materie prime, incluse biomasse lignocellulosiche, zuccheri, residui agricoli o anche gas di scarto industriali opportunamente valorizzati. In questo senso, i percorsi ATJ appaiono particolarmente significativi non soltanto per le prospettive

tecnologiche, ma anche per la loro capacità di ampliare il ventaglio delle basi materiali della filiera SAF.

Nel caso dell'impiego di etanolo, la prima fase di deidratazione conduce alla produzione di etilene. La diretta oligomerizzazione dell'etilene presenta rese relativamente basse in termini di *Jet fuel* e, di conseguenza, economie di processo meno favorevoli. Per questa ragione sono state sviluppate configurazioni alternative, che prevedono la conversione dell'etanolo in composti intermedi compresi tra C_4 e C_{10}, quali butene e 1-esene, attraverso processi già sviluppati a livello commerciale (cfr. Figura 1.19). Il vantaggio di tale configurazione risiede nella migliore efficienza della successiva fase di oligomerizzazione, che consente di ottenere rese più elevate di *Jet fuel*. Una terza via consiste nella conversione dell'etanolo in propilene; questa opzione presenta il vantaggio di eliminare il passaggio intermedio e di consentire una buona oligomerizzazione, ma risulta generalmente associata a una resa finale in *Jet fuel* più contenuta.

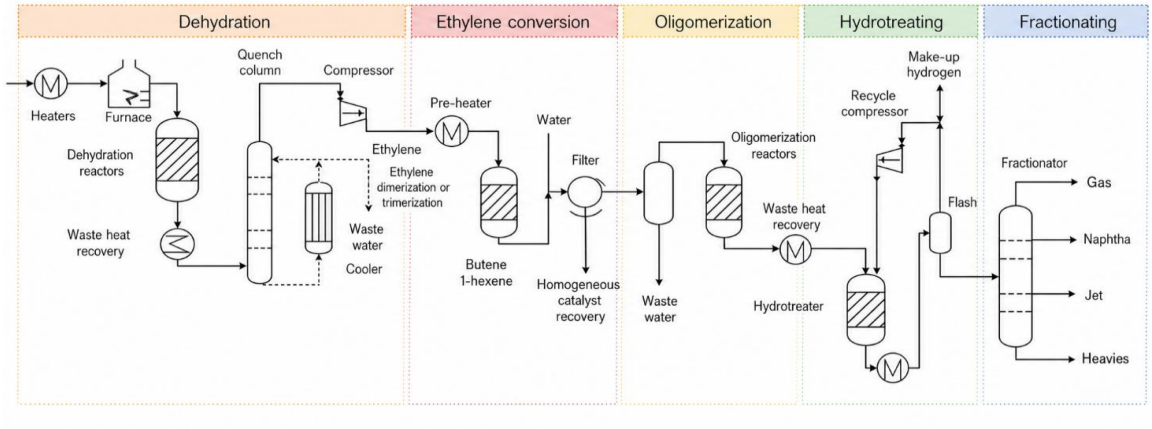


Figura 1.19: Schema di processo ATJ, con produzione di composti intermedi.
Fonte: The Alcohol-to-Jet Conversion Pathway for Drop-In Biofuels: Techno-Economic Evaluation

Accanto ai percorsi basati sull'etanolo, sono stati sviluppati anche processi ATJ che utilizzano isobutanolo come materia prima. L'isobutanolo presenta alcuni vantaggi rispetto all'etanolo, ad esempio possiede un contenuto energetico più elevato, una minore solubilità in acqua e consente di svolgere la fase di deidratazione a temperature e pressioni inferiori. Inoltre, i derivati dell'isobutanolo possono essere oligomerizzati con maggiore facilità, raggiungendo rendimenti più elevati in termini di produzione di *Jet fuel*. Va osservato che, pur essendo possibile convertire impianti esistenti per la produzione di etanolo alla produzione di isobutanolo con modifiche relativamente contenute, tale opzione può comportare una minore resa volumetrica dell'alcol ottenuto.

La possibilità di ottenere gli alcoli di partenza da una pluralità di fonti e processi rende l'ATJ una filiera particolarmente promettente nel medio-lungo periodo, in quanto potenzialmente

idonea ad affiancarsi all'HEFA, riducendo la dipendenza da *feedstock* lipidici e contribuendo a diversificare le opzioni produttive disponibili.

Catalytic Hydrothermolysis Jet (CHJ)

Il percorso tecnologico definito nell'Annex A6 della ASTM D7566 introduce la produzione di carburanti sostenibili tramite CHJ, noto anche come processo di Biofuel Isoconversion (cfr. Figura 1.20). Tale tecnologia, sviluppata da Applied Research Associates in collaborazione con Chevron Lummus Global, si articola in tre fasi principali: una prima fase di catalytic hydrothermolysis (CH), in cui oli di origine biologica vengono convertiti in un biocrude attraverso condizioni di alta temperatura e pressione in ambiente acquoso; una successiva fase di hydroprocessing, finalizzata alla saturazione delle olefine e alla rimozione dell'ossigeno, migliorando così la stabilità e le proprietà chimiche del prodotto; e infine una fase di frazionamento, analoga a quella impiegata nella raffinazione petrolifera convenzionale. Il processo consente di ottenere prodotti quali nafta, *bio-Jet fuel* e biodiesel *drop-in*, ovvero pienamente compatibili con le infrastrutture e i motori esistenti, rappresentando pertanto una soluzione tecnologicamente matura e integrabile per la decarbonizzazione del settore aeronautico.

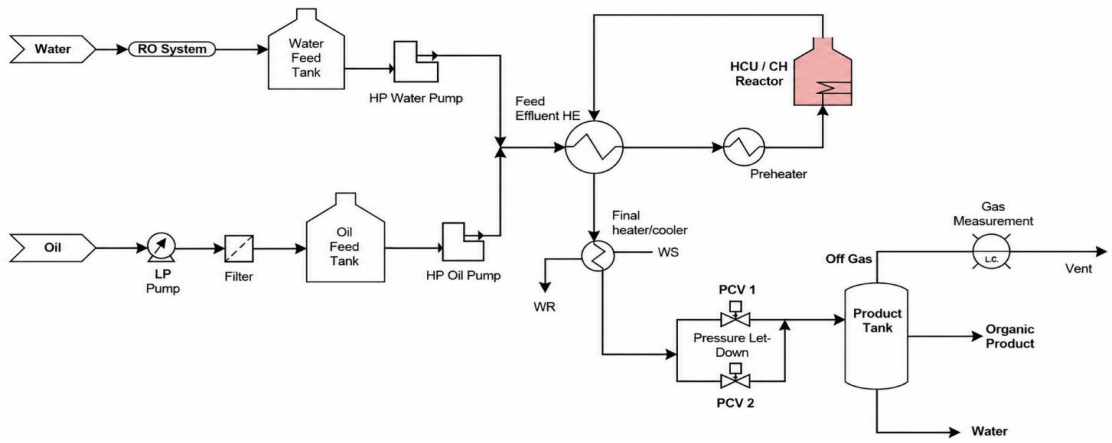


Figura 1.20: Schema di processo relativo allo step di CHJ.
Fonte: HTL - Hydrothermal Liquefaction

Power-to-Liquids (PtL) o *E-fuels*

La tecnologia *Power-to-Liquid*, nota anche come *e-fuel* o, in ambito europeo, come Renewable Fuel of Non-Biological Origin (RFNBO), rappresenta una delle opzioni più promettenti per la decarbonizzazione del settore aeronautico. Questa consente, infatti, la produzione di combustibili liquidi sintetici utilizzabili nei motori e nelle infrastrutture esistenti, sfruttando principalmente energia elettrica da fonti rinnovabili.

Il processo (cfr. Figura 1.21) è basato sulla combinazione tra idrogeno, ottenuto tramite elettrolisi dell'acqua, e anidride carbonica. Attraverso diverse fasi intermedie, la CO_2 viene prima convertita in monossido di carbonio, che viene poi utilizzato per la sintesi di idrocarburi liquidi. Quando l'elettricità impiegata è di origine rinnovabile e la CO_2 proviene da processi di recupero o dalla cattura diretta dall'aria, il potenziale di riduzione delle emissioni risulta molto elevato, con valori stimati fino a circa l'85% e, in scenari teorici, emissioni nette prossime allo zero.

Nonostante il forte potenziale ambientale, la diffusione del PtL è ancora limitata da diversi fattori. I principali ostacoli riguardano gli elevati costi di produzione, attualmente stimati intorno a 3,60–4,02 USD/L, la necessità di grandi quantità di idrogeno rinnovabile e gli alti consumi energetici associati alla cattura diretta della CO_2 dall'atmosfera[15]. Questi aspetti rendono il divario economico particolarmente rilevante per il settore aeronautico, che opera spesso con margini di profitto ridotti. Inoltre, la maturità tecnologica del sistema integrato si colloca ancora in una fase intermedia, con valori di TRL compresi tra 5 e 7 per alcuni processi, confermando che la tecnologia si trova tuttora in una fase di transizione verso una possibile applicazione su larga scala.

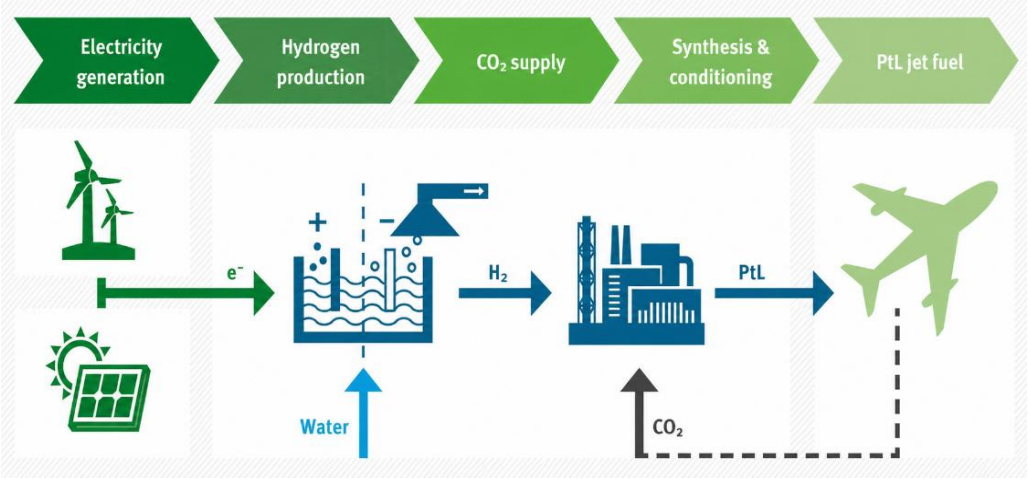


Figura 1.21: Schema di produzione del PtL.
Fonte: Report IEA (International Energy Agency)

1.5.2 Settore marittimo

Parallelamente, la decarbonizzazione del trasporto via mare non si fonda su una sola filiera dominante, ma su un insieme eterogeneo di carburanti alternativi, che si distinguono per diversi livelli di maturità tecnologica, disponibilità industriale e compatibilità con le infrastrutture esistenti. In questo quadro assumono particolare rilievo il bioLNG, il bioLPG e il rDME, il biodiesel (FAME), l'HVO e il metanolo, nonché, in una prospettiva di più lungo termine, l'e-metanolo e il bio-metanolo, gli *e-fuels*, l'idrogeno e l'ammoniaca[20].

Questa eterogeneità è chiaramente riflessa nell'evoluzione recente della flotta e del portafoglio ordini del settore marittimo (cfr. Figure 1.22 e 1.23), che evidenziano una crescita significativa delle navi alimentate da combustibili alternativi e una progressiva diversificazione delle tecnologie adottate.

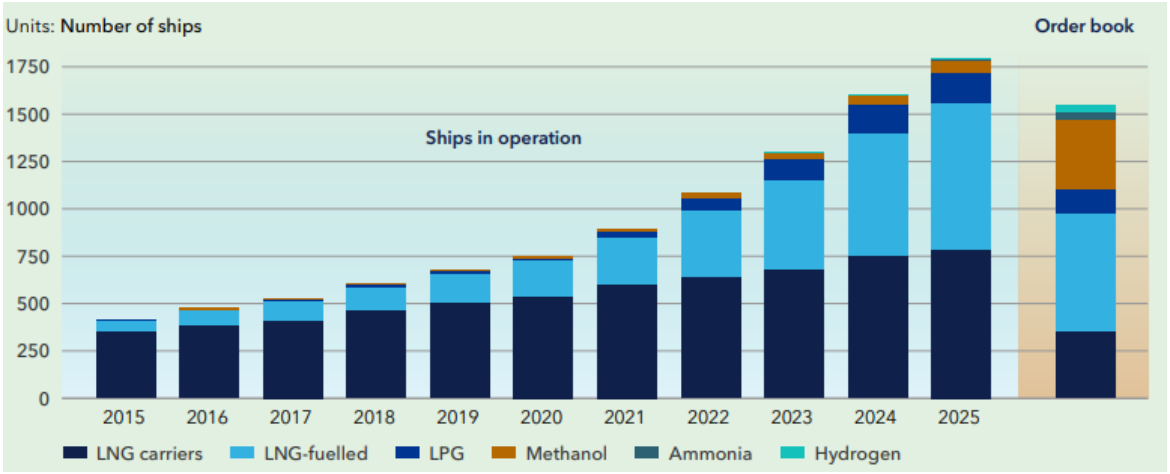


Figura 1.22: Crescita del numero di navi alimentate da combustibili alternativi.
Fonte: Alternative Fuels Insight (AFI)

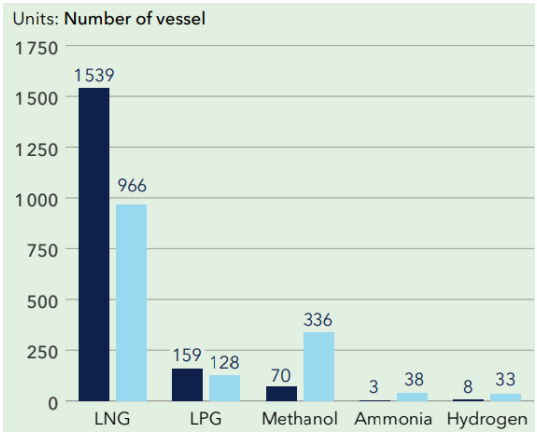


Figura 1.23: Confronto delle navi attualmente esistenti (barre scure) con quelle ordinate nei cantieri navali (barre chiare). Fonte: Alternative Fuels Insight (AFI)

L'LNG rappresenta attualmente il combustibile alternativo dominante in termini di diffusione nella flotta esistente (cfr. Figure 1.22 e 1.23), riflettendo un elevato grado di maturità tecnologica e infrastrutturale. Al contempo, l'analisi dell'orderbook evidenzia una crescita significativa del metanolo, che si configura come una delle principali soluzioni di transizione nel breve e medio periodo.

Al contrario, ammoniaca e idrogeno presentano ancora una diffusione limitata in termini di unità operative e nuovi ordini. Ciò non implica un ruolo marginale nel percorso di

decarbonizzazione del settore, ma evidenzia piuttosto che il loro impiego come combustibili marittimi è ancora in una fase iniziale di sviluppo e commercializzazione.

Un ulteriore elemento di interesse riguarda la dinamica più recente degli ordini di navi alimentate da combustibili alternativi, che consente di cogliere le tendenze di breve periodo del settore.

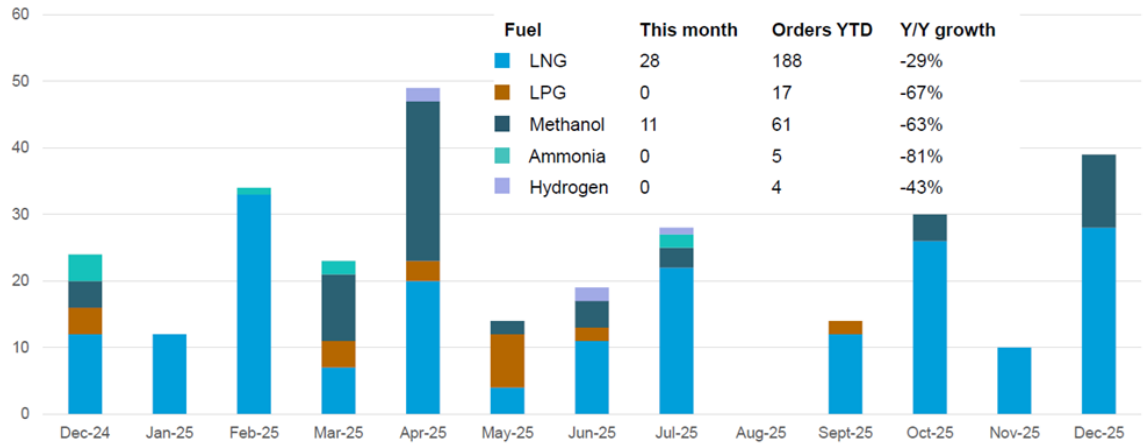


Figura 1.24: Numero di navi alimentate da combustibili alternativi aggiunte all'orderbook nel 2025, per tipologia di fuel e distribuzione mensile.
Fonte: Alternative Fuels Insight (AFI)

bioLNG

Nel caso del bioLNG, il processo si sviluppa a partire dalla produzione di biometano, successivamente liquefatto secondo modalità analoghe a quelle del LNG convenzionale. Le materie prime impiegate per la produzione del biometano sono costituite prevalentemente da colture agricole, residui e sottoprodotti agricoli e zootecnici, frazione organica dei rifiuti solidi urbani, fanghi di depurazione e altri residui organici. La tecnologia oggi maggiormente diffusa per la produzione di biometano è la digestione anaerobica, un processo biologico nel quale la sostanza organica viene degradata da microrganismi in assenza di ossigeno, con formazione di biogas, costituito principalmente da metano e anidride carbonica[39].

Affinché il biogas possa essere utilizzato come combustibile, è necessario sottoporlo a una fase di *upgrading* finalizzata alla rimozione della CO_2 e delle impurità residue, così da ottenere biometano con caratteristiche compatibili con gli usi energetici avanzati. Le tecnologie di *upgrading* possono essere diverse, tra cui *scrubbing* ad acqua, *scrubbing* fisico

[39] *Prussi, M., Padella, M. et al., Review of technologies for biomethane production and assessment of EU transport share in 2030.*

con solventi organici, *scrubbing* amminico, *pressure swing adsorption* e separazione a membrane. Una volta ottenuto, il biometano viene liquefatto e trasformato in bioLNG[40].

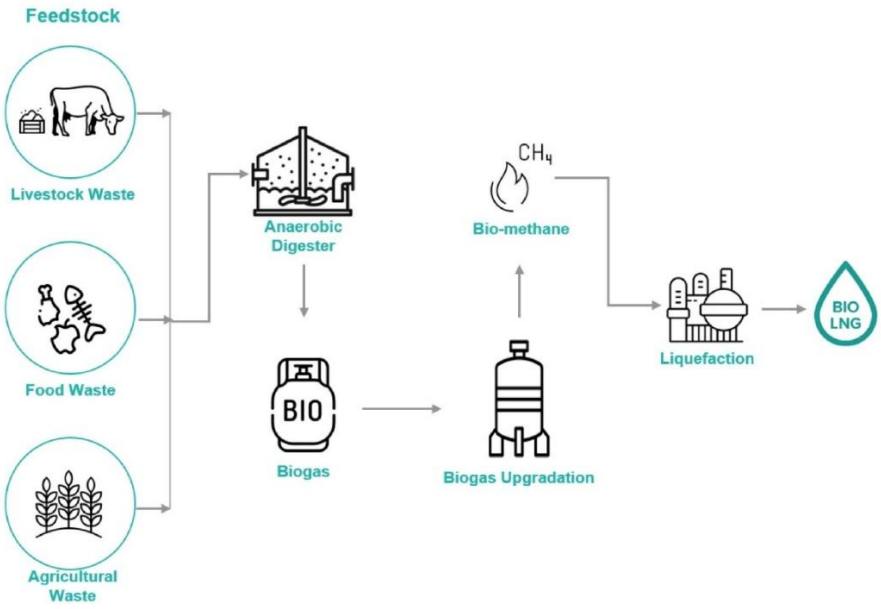


Figura 1.25: Schema del processo di produzione del bioLNG.
Fonte: Bio-LNG, The clean fuel evolution transforming LNG's future

Accanto alla digestione anaerobica (cfr. Figura 1.25), può essere richiamato anche un secondo percorso di produzione del metano rinnovabile, basato sulla gassificazione termochimica della biomassa solida. In questo caso, residui lignocellulosici o biomasse di natura forestale vengono convertiti, in presenza controllata di ossigeno, in un gas di sintesi costituito prevalentemente da monossido di carbonio e idrogeno. Il *syngas* viene poi sottoposto a metanazione per ottenere metano sintetico, successivamente liquefabile[41].

bioLPG e rDME

Dal punto di vista della transizione energetica, l'interesse verso il LPG deriva soprattutto dalla possibilità di affiancargli componenti rinnovabili, quali il bioLPG e il dimetiletere rinnovabile.

La produzione del bioLPG può avvenire attraverso differenti percorsi tecnologici. Una delle modalità attualmente più rilevanti è quella collegata ai processi di produzione dell'HVO

---

[40] Qyyum, M. A. et al., Biogas to liquefied biomethane: Assessment of 3P's—Production, processing, and prospects.
[41] UMAS, A strategy for the transition to zero-emission shipping, Getting to Zero Coalition / World Economic Forum, 2021.

(cfr. Figura 1.26), nei quali il bioLPG si genera come co-prodotto durante le fasi di idrogenazione di oli vegetali e altre matrici lipidiche. A questo canale si aggiungono altri percorsi più innovativi, basati sul reforming del biogas e sul successivo *upgrading* del gas di sintesi in prodotti intermedi, come il metanolo, successivamente convertiti in bioLPG. Un'ulteriore possibilità consiste nell'impiego diretto di biomasse di scarto, ad esempio la frazione organica dei rifiuti urbani, da sottoporre a processi di gassificazione per ottenere *syngas* e, successivamente, bioLPG tramite opportune reazioni di *upgrading*[42] [43].

Per quanto riguarda il dimetiletere rinnovabile, o rDME, i percorsi produttivi risultano anch'essi diversi. Una prima via consiste nella produzione di biometanolo e nella sua successiva conversione in DME[44]. Una seconda opzione è rappresentata dalla sintesi diretta a partire da *syngas* ottenuto mediante gassificazione di vari *feedstock*, tra cui FORSU, residui agricoli, reflui zootecnici e rifiuti industriali[45]. Una terza, di particolare interesse prospettico, è costituita dai processi *power-to-X*, nei quali il combustibile viene prodotto a partire da idrogeno ottenuto da energia elettrica e CO_2 catturata. In tale schema, l'idrogeno e l'anidride carbonica vengono combinati e convertiti attraverso reazioni di sintesi in rDME.

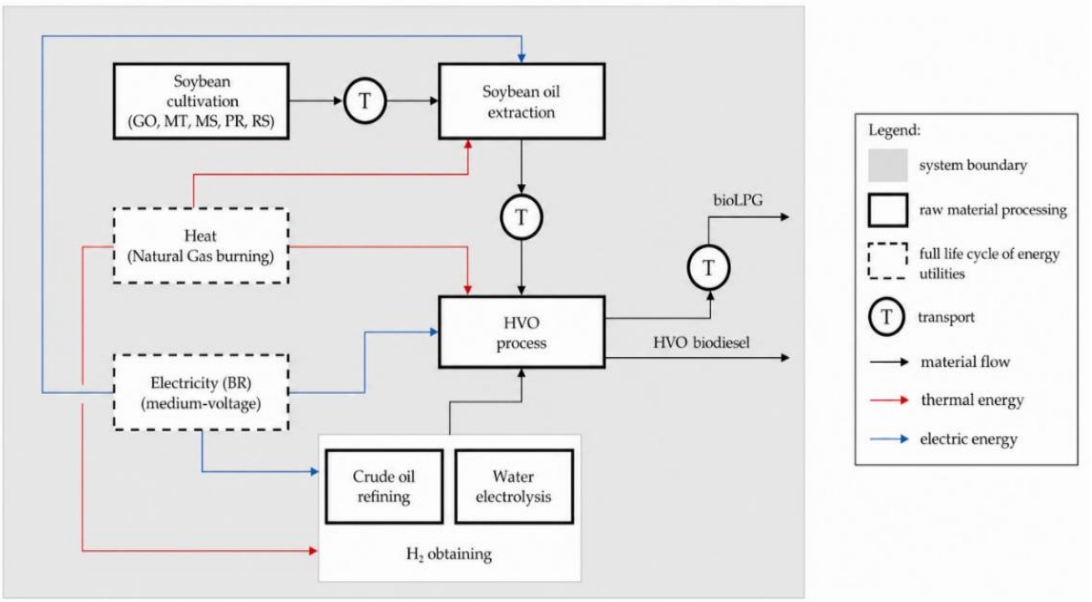


Figura 1.26: Schema di produzione del bioLPG come co-prodotto del processo HVO.
Fonte: Menezes et al., Obtaining bioLPG via the HVO route in Brazil

[42] *Johnson, E., Process technologies and projects for BioLPG.*
[43] *Menezes, N. de A., Cunha, I. L. C., dos Santos, M. T., & Kulay, L., Obtaining bioLPG via the HVO route in Brazil: A prospect study based on life cycle assessment approach, 2022.*
[44] *Dieterich, V., Neumann, K., Niederdränk, A., Spliethoff, H., & Fendt, S., Techno-economic assessment of renewable dimethyl ether production pathways from hydrogen and carbon dioxide in the context of power-to-X, 2024.*
[45] *Liuzzi, D., Peinado, C., Peña, M. A., van Kampen, J., Boon, J., & Rojas, S., Increasing dimethyl ether production from biomass-derived syngas via sorption enhanced dimethyl ether synthesis, 2020.*

Biodiesel (FAME)

Il biodiesel, nella forma degli esteri metilici degli acidi grassi, costituisce uno dei principali biocarburanti liquidi disponibili per la sostituzione parziale del gasolio fossile. La sua rilevanza nel settore marittimo deriva dalla possibilità di essere impiegato in miscela nei motori diesel, sfruttando una filiera logistica in larga parte assimilabile a quella dei combustibili petroliferi[46].

Il processo di produzione del biodiesel FAME si basa sulla transesterificazione di oli e grassi di origine vegetale o animale con alcol metilico (cfr. Figura 1.27). Attraverso questa reazione chimica, i trigliceridi contenuti nella materia prima vengono convertiti in esteri metilici, che costituiscono il biodiesel vero e proprio. Le materie prime possono appartenere sia alla prima generazione, come oli di palma, colza e soia, sia alla seconda generazione, comprendendo residui, scarti agricoli, oli alimentari esausti rigenerati e grassi animali. L'evoluzione verso *feedstock* derivanti da rifiuti e sottoprodotti è particolarmente significativa poiché consente di limitare la competizione con il settore alimentare e di ridurre gli impatti indiretti legati al cambiamento d'uso del suolo.

Sotto il profilo energetico, il biodiesel possiede una densità energetica inferiore ma comunque prossima a quella del gasolio tradizionale, caratteristica che ne favorisce l'impiego senza rilevanti adattamenti dei serbatoi di bordo. Il suo contributo alla decarbonizzazione dipende in misura rilevante dalla natura della materia prima utilizzata: i valori di riduzione delle emissioni risultano significativamente più elevati nel caso di *feedstock* derivanti da rifiuti e residui rispetto a quelli ottenuti da colture dedicate[47].

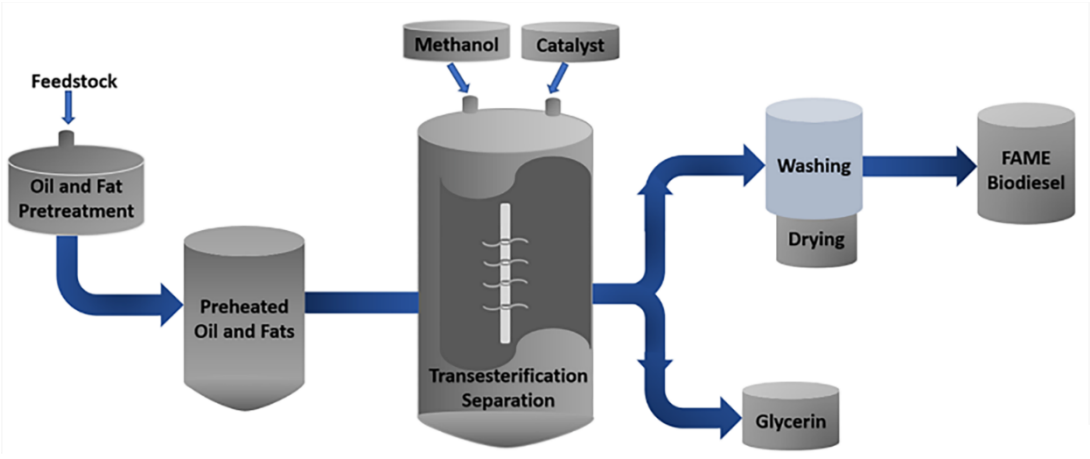


Figura 1.27: Schema di produzione del Biodiesel (FAME).
Fonte: What to know about renewable diesel and biodiesel Baker Institute for Public Policy, Rice University

[46] *IEA Bioenergy, Progress towards biofuels for marine shipping, 2020.*
[47] *Jeswani, H. K., Chilvers, A., & Azapagic, A., Environmental sustainability of biofuels: A review, 2020.*

HVO

L'HVO rappresenta un biocarburante avanzato ottenuto tramite un processo chimico differente rispetto al biodiesel FAME e, sotto il profilo tecnologico, risulta più vicino ai combustibili fossili convenzionali. La sua produzione avviene a partire da oli vegetali, grassi animali, oli esausti rigenerati e altre matrici derivanti da rifiuti e residui. Il cuore del processo è costituito dall'idrogenazione o idrotrattamento, attraverso cui l'ossigeno contenuto nelle biomasse viene completamente rimosso[48].

In seguito alla fase di idrotrattamento, il prodotto viene sottoposto a isomerizzazione, processo che consente di migliorare le proprietà a freddo e di ottenere un combustibile con caratteristiche pienamente idonee agli usi energetici. Il risultato finale è un idrocarburo paraffinico privo di ossigeno, zolfo e composti aromatici, con proprietà chimico-fisiche molto simili a quelle del gasolio convenzionale. Proprio questa natura idrocarburica rende l'HVO un carburante nativamente *drop-in*, idoneo all'impiego in miscela anche ad elevate percentuali e, nei sistemi compatibili, anche in forma pura.

Anche in questo caso, la sostenibilità complessiva del prodotto dipende in misura rilevante dall'origine delle materie prime impiegate. L'orientamento verso *feedstock* di scarto e residuo appare particolarmente coerente con i principi dell'economia circolare e con gli obiettivi europei di contenimento delle emissioni lungo l'intero ciclo di vita del combustibile.

Metanolo

Il metanolo rappresenta una delle più rilevanti opzioni di combustibile alternativo per il trasporto marittimo, in quanto coniuga una già ampia disponibilità industriale con una relativa semplicità di gestione logistica. A differenza di altri vettori energetici che richiedono condizioni particolarmente complesse di stoccaggio e movimentazione, il metanolo si presenta infatti come un combustibile liquido a temperatura e pressione ambiente, caratteristica che ne agevola il trasporto, il bunkeraggio e l'integrazione nelle infrastrutture già esistenti, rendendolo una soluzione concretamente utilizzabile anche nella fase attuale della transizione energetica del settore. Sotto il profilo normativo, il suo impiego rientra nell'ambito dell'IGF Code ed è oggetto di specifiche linee guida internazionali per l'utilizzo sicuro a bordo delle navi[49]. Occorre tuttavia distinguere tra il metanolo convenzionale e le sue varianti rinnovabili, vale a dire il bio-metanolo e l'e-metanolo. Il primo è ottenuto a partire da biomasse sostenibili, mediante processi di fermentazione o gassificazione con successiva produzione di *syngas* e conversione in metanolo; il secondo deriva invece dalla sintesi tra idrogeno prodotto da elettricità rinnovabile e CO_2 catturata,

---

[48] *Gomes, D. M. et al., A review of advanced techniques in hydrotreated vegetable oils production and life cycle analysis, Biomass and Bioenergy, 2025.*

[49] *IMO, Interim guidelines for the safety of ships using methyl/ethyl alcohol as fuel, 2020.*

configurandosi come una delle soluzioni maggiormente coerenti con gli obiettivi di decarbonizzazione profonda del comparto[50] (cfr. Figura 1.28). In termini ambientali, infatti, il metanolo da fonti rinnovabili può assicurare riduzioni significative delle emissioni climalteranti lungo l'intero ciclo di vita, oltre a presentare il vantaggio di non emettere ossidi di zolfo e polveri sottili e di contribuire solo in misura limitata alla formazione di ossidi di azoto. Permangono, tuttavia, alcune criticità, legate soprattutto alla tossicità del prodotto, alla necessità di specifiche misure di sicurezza nelle operazioni di bordo e alla disponibilità ancora limitata di metanolo verde su scala commerciale. Ne consegue che il metanolo deve essere considerato, nel quadro dei carburanti alternativi per il trasporto marittimo, una distinta famiglia di combustibili da collocare sullo stesso piano di LNG, LPG, idrogeno e ammoniaca, mentre bio-metanolo ed e-metanolo ne costituiscono varianti produttive interne, particolarmente rilevanti nella prospettiva di una progressiva riduzione della carbon intensity del settore[51].

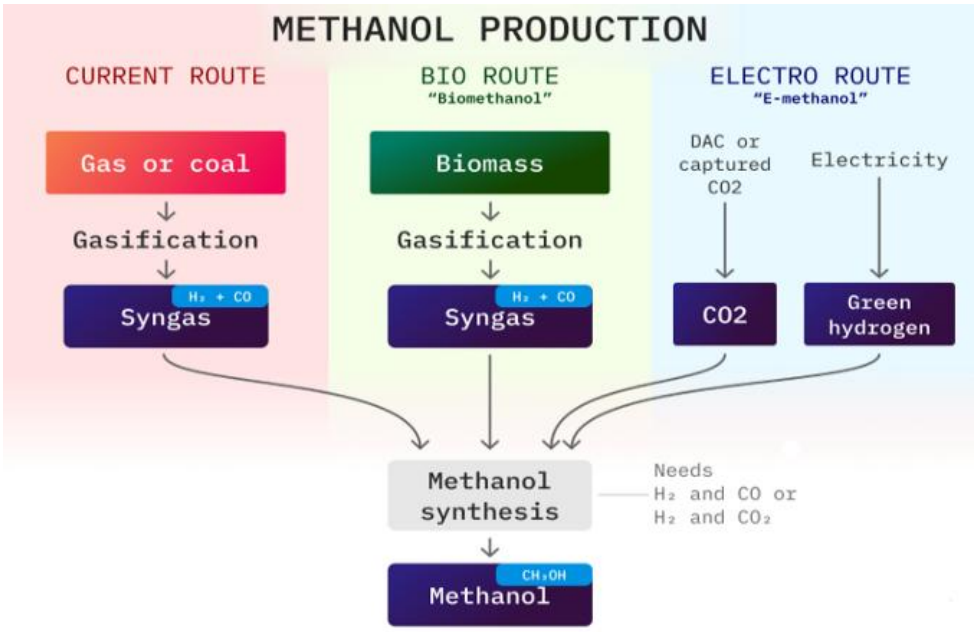


Figura 1.28: Percorsi di produzione del metanolo convenzionale, bio-metanolo ed e-metanolo. Fonte: James, B. (2024, June 3), Ethanol and methanol

E-fuels

Tra le opzioni energetiche considerate gli *e-fuels* occupano una posizione di rilievo, soprattutto per la loro potenziale compatibilità con sistemi motoristici, logistici e infrastrutturali già esistenti. Con il termine *e-fuels* si indicano combustibili sintetici, liquidi o gassosi, prodotti a partire da idrogeno ottenuto da elettricità rinnovabile o *low-carbon* e

[50] *IRENA, & Methanol Institute, Innovation outlook: Renewable methanol, 2021.*
[51] *Methanol Institute, Renewable methanol report, 2018.*

da anidride carbonica catturata da impianti industriali o direttamente dall'atmosfera. Il loro interesse strategico risiede nel fatto che possono essere formulati in modo da risultare analoghi, dal punto di vista merceologico e funzionale, ai corrispondenti combustibili convenzionali, come diesel sintetico, metano sintetico, metanolo sintetico o altri vettori *carbon-based*[52].

La filiera produttiva degli *e-fuels* prende avvio dalla produzione di idrogeno decarbonizzato, che rappresenta il reagente energetico fondamentale dell'intero processo. L'idrogeno può essere ottenuto mediante elettrolisi dell'acqua alimentata da energia rinnovabile oppure, in una configurazione *low-carbon*, tramite reforming del gas naturale associato a sistemi di cattura e stoccaggio della CO_2. Una volta ottenuto, l'idrogeno viene combinato con CO_2 catturata da fonti concentrate, da flussi biogenici o direttamente dall'aria, e convertito in combustibili sintetici attraverso differenti vie di sintesi.

Per la produzione di idrocarburi sintetici liquidi, una delle vie principali è il processo Fischer-Tropsch, che consente di convertire *syngas* derivato da idrogeno e CO_2 in combustibili sintetici (cfr. Figura 1.29). Altri *e-fuels* marittimi, come *e-methanol* o *e-methane*, seguono invece percorsi di sintesi specifici. Il risultato finale può essere un combustibile che replica in larga misura il comportamento del corrispondente prodotto fossile, aspetto particolarmente rilevante nel settore marittimo, dove la compatibilità con il parco navale esistente costituisce un vantaggio nella fase di transizione.

Dal punto di vista ambientale, gli *e-fuels* possono avvicinarsi alla neutralità carbonica solo se l'elettricità impiegata proviene da fonti rinnovabili e se la CO_2 utilizzata deriva da cattura diretta dall'aria o da fonti biogeniche sostenibili. In termini teorici, la combustione rilascia la CO_2 precedentemente impiegata nella sintesi; tuttavia, una valutazione rigorosa deve necessariamente adottare l'approccio *Well-to-Wake*, considerando le emissioni prodotte lungo l'intera filiera di produzione, distribuzione e utilizzo del combustibile[53].

[52] *Zanobetti F. et al., Quantitative sustainability assessment of e-fuels for maritime transport, 2025.*
[53] *McKinlay, C. J. et al., Alternative shipping fuels: Modelling wind-farm-to-wake emissions, 2022.*

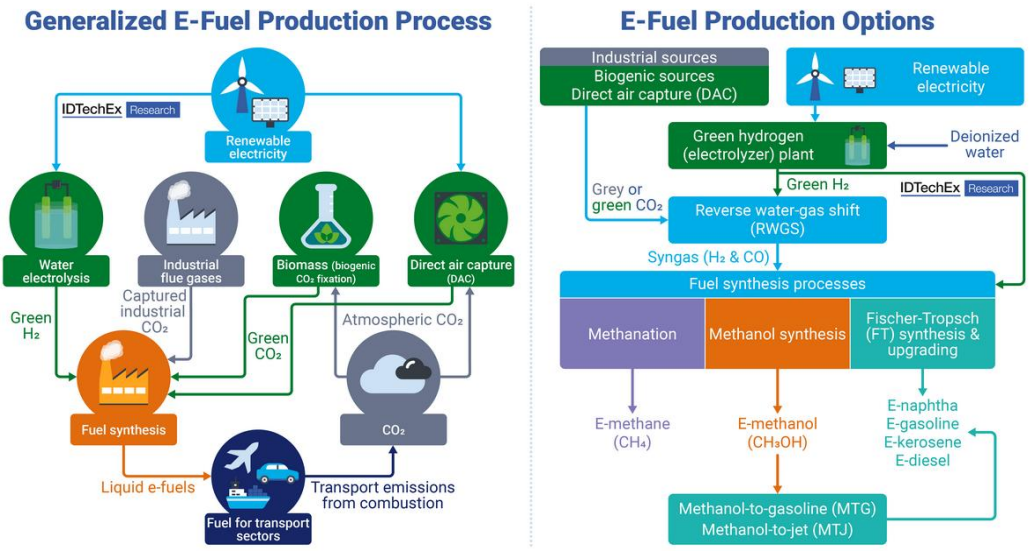


Figura 1.29: Schema generale del processo di produzione degli e-fuels.
Fonte: GreenPlanner. (2025, January 3). E-fuels, sono la soluzione per il futuro della transizione energetica? GreenPlanner Magazine

Idrogeno

L'idrogeno è considerato uno dei vettori energetici più rilevanti nel dibattito internazionale sulla decarbonizzazione dei trasporti, inclusa la navigazione marittima. La sua importanza risiede soprattutto nel fatto che può essere utilizzato sia direttamente, ad esempio in celle a combustibile o in motori a combustione interna, sia indirettamente, come materia prima per la sintesi di altri combustibili *low-carbon*, quali *e-fuels*, e-metanolo ed e-ammoniaca[54]. In ambito marittimo, il ruolo dell'idrogeno appare dunque duplice: da un lato come vettore energetico autonomo, dall'altro come elemento intermedio per la produzione di altri carburanti più facilmente trasportabili e stoccabili.

La filiera dell'idrogeno si articola in tre momenti fondamentali: produzione, stoccaggio e distribuzione. Per quanto concerne la produzione, la modalità oggi più diffusa a livello globale è il reforming del gas naturale. Qualora il medesimo processo venga integrato con sistemi di cattura e stoccaggio della CO_2, si parla di "idrogeno blu". L'alternativa più coerente con gli obiettivi di neutralità climatica è rappresentata dall'"idrogeno verde", ottenuto tramite elettrolisi dell'acqua alimentata da elettricità rinnovabile[55].

Per renderne possibile l'impiego, l'idrogeno deve essere immagazzinato mediante tecnologie specifiche, le due opzioni più mature sono lo stoccaggio in forma compressa e quello in forma liquida criogenica. Nel primo caso, l'idrogeno viene accumulato in serbatoi ad alta pressione; nel secondo, viene raffreddato fino a temperature prossime a -253 °C per

[54] *EMSA, Potential of hydrogen as fuel for shipping, 2023.*
[55] *IEA, Global hydrogen review 2023.*

mantenerlo allo stato liquido. Nel settore marittimo, l'idrogeno può essere impiegato direttamente in celle a combustibile, che convertono la sua energia chimica in elettricità tramite reazione con l'ossigeno, alimentando così motori elettrici, oppure in motori a combustione interna opportunamente adattati[56].

Ammoniaca

L'ammoniaca sta assumendo un ruolo crescente nel dibattito sulla decarbonizzazione del trasporto marittimo, soprattutto in ragione delle sue caratteristiche di vettore energetico *carbon-free* allo scarico e della maggiore facilità di stoccaggio rispetto all'idrogeno[57]. Tradizionalmente utilizzata come materia prima nell'industria chimica, essa è oggi oggetto di crescente attenzione anche come possibile *bunker fuel* per la navigazione a lunga percorrenza.

La produzione convenzionale di ammoniaca si basa sul processo Haber-Bosch, che combina idrogeno e azoto ad alte temperature e pressioni. L'idrogeno necessario viene oggi ottenuto prevalentemente tramite *steam methane reforming* del gas naturale, mentre l'azoto viene separato dall'aria[57]. La possibilità di rendere l'ammoniaca compatibile con gli obiettivi di decarbonizzazione dipende dalla decarbonizzazione del processo produttivo dell'idrogeno utilizzato nella sintesi. In questo quadro si distinguono due opzioni principali: l'ammoniaca "blu", prodotta a partire da idrogeno ottenuto via reforming del gas naturale con cattura e stoccaggio della CO_2, e l'ammoniaca *green*, prodotta mediante idrogeno verde ottenuto da elettrolisi alimentata da fonti rinnovabili.

Dal punto di vista delle proprietà fisiche, l'ammoniaca presenta caratteristiche che la rendono particolarmente interessante per l'impiego marittimo. Essa può essere liquefatta con relativa facilità rispetto all'idrogeno e può essere stoccata in forma liquida in condizioni di pressione e temperatura meno estreme. Questa maggiore semplicità di stoccaggio e trasporto la rende anche un potenziale vettore di idrogeno, poiché può essere utilizzata per trasportarlo indirettamente e rilasciarlo successivamente quando necessario[58].

Sotto il profilo applicativo, l'ammoniaca può essere impiegata sia in motori a combustione interna sia in celle a combustibile. In linea teorica, la sua combustione non genera emissioni di CO_2 allo scarico, poiché la molecola non contiene carbonio.

L'analisi dei processi produttivi delle principali fonti energetiche destinate al trasporto marittimo mostra come bioLNG, bioLPG, biodiesel, HVO e metanolo consentano di intervenire nel breve e medio termine sul profilo emissivo del settore, valorizzando in misura significativa reti logistiche e apparati già esistenti. Nel lungo termine, sarà necessario affiancare ad essi una crescita di altri vettori energetici, tra cui ammoniaca, idrogeno, e-

[56] *EMSA, Hazard identification of generic hydrogen fuel systems, 2025.*
[57] *IEA, Ammonia technology roadmap: Towards more sustainable nitrogen fertiliser production, 2021.*
[58] *IRENA & Ammonia Energy Association, Innovation outlook: Renewable ammonia, 2022.*

metanolo e bio-metanolo ed *e-fuels*. Questa varietà di *pathway* costituisce al tempo stesso una risorsa e una fonte di complessità: una risorsa perché amplia le possibilità di decarbonizzazione in un settore difficilmente elettrificabile, una fonte di complessità perché sposta l'attenzione dai soli profili definitori alla concreta possibilità di rendere tali filiere disponibili, economicamente sostenibili e scalabili.

1.6 Sfide tecnologiche per l'introduzione dei carburanti sostenibili

1.6.1 Settore aeronautico

Technology Readiness Level (TRL) e Fuel Readiness Level (FRL)

Le soluzioni riportate nel paragrafo 1.5, per quanto concerne le tecnologie produttive, non presentano tutte un livello di maturità tecnologica tale da poter essere operative nel breve-medio periodo. La quantificazione dello stato di sviluppo di una tecnologia fa riferimento al Technology Readiness Level (TRL), che varia da 1, relativo alla ricerca di base, a 9, corrispondente a un sistema dimostrato in ambiente operativo o commerciale[59] (cfr. Figura 1.30). Il TRL non esaurisce la valutazione della maturità di una filiera SAF poiché aspetti quali certificazione, disponibilità del *feedstock*, costi, scalabilità industriale e stato del mercato possono limitarne l'effettiva applicazione. Per questo motivo, la Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative (CAAFI) ha introdotto il Fuel Readiness Level (FRL), utilizzato per descrivere il grado di avanzamento specifico dei combustibili alternativi per l'aviazione[60].

[59] *European Commission, Technology Readiness Levels (TRL), 2014.*
[60] *CAAFI, Fuel Readiness Level Exit Criteria for Alternative Jet fuels, 2013.*

FRL	Description	Toll Gate	Fuel Quantity+
1	Basic Principles Observed and Reported	Feedstock /process *principles* identified.	
2	Technology Concept Formulated	Feedstock /*complete* process identified.	
3	Proof of Concept	Lab scale fuel sample produced from realistic production feedstock. Energy balance analysis executed for initial environmental assessment. Basic fuel properties validated.	0.13 US gallons (500 ml)
4.1 4.2	Preliminary Technical Evaluation	System performance and integration studies entry criteria/specification properties evaluated (MSDS/D1655/MIL 83133)	10 US gallons (37.8 litres)
5	Process Validation	Sequential scaling from laboratory to pilot plant	80 US gallons (302.8 litres) to 225,000 US gallons (851,718 litres)
6	Full-Scale Technical Evaluation	Fitness, fuel properties, rig testing, and engine testing *	80 US gallons (302.8 litres) to 225,000 US gallons (851,718 litres)
7	Fuel Approval	Fuel class/type listed in international fuel standards**	
8	Commercialization Validated	Business model validated for production airline/military purchase agreements – Facility specific GHG assessment conducted to internationally accepted independent methodology	
9	Production Capability Established	Full scale plant operational++	

Figura 1.30: Fuel Readiness Level per carburanti aeronautici alternativi.
Fonte: White paper di CAAFI

In Tabella 1.3 sono riportati i *pathway*, approvati in ambito ICAO/ASTM, ritenuti più rilevanti ai fini della transizione energetica, ossia quelli caratterizzati da un maximum blend ratio pari al 50% e da valori di TRL/FRL già relativamente avanzati. Il limite massimo di miscelazione non rappresenta di per sé un indicatore di sostenibilità o disponibilità commerciale, ma consente di individuare le filiere con maggiore potenziale tecnico di sostituzione del *Jet fuel* fossile nella miscela finale. In questa prospettiva, risultano prioritari i processi HEFA, FT-SPK, FT-SPK/A e ATJ-SPK, mentre filiere con blend ratio inferiore o con livelli di maturità meno documentati vengono considerate meno centrali nell'analisi principale.

Pathway	Riferimento ASTM	*Maximum blend ratio*	TRL	FRL
FT-SPK	ASTM D7566 Annex A1	50%	6-8	6-7
FT-SPK/A	ASTM D7566 Annex A4	50%	6-8	6-7

Pathway	Riferimento ASTM	*Maximum blend ratio*	TRL	FRL
HEFA-SPK	ASTM D7566 Annex A2	50%	8-9 / 9	9
ATJ-SPK	ASTM D7566 Annex A5	50%	7-8	7
CHJ	ASTM D7566 Annex A6	50%	6	5-6
PtL / e-SAF via FT-SPK	ASTM D7566 Annex A1, se prodotto tramite FT	50%	5-8	5-6

Tabella 1.3: Tabella comparativa dei pathway SAF considerati.
Fonte: IEA, Clean Energy Technology Guide (ETP Dataset)

Nota: il PtL non costituisce un pathway ASTM autonomo distinto, ma una modalità di produzione di e-SAF basata su idrogeno verde e CO_2. Quando il syngas ottenuto viene convertito tramite Fischer-Tropsch, il carburante può ricadere nel pathway FT-SPK, certificato secondo ASTM D7566 Annex A1. Per questo motivo, nella tabella il PtL è indicato come "PtL / e-SAF via FT-SPK" e non come Annex A6, che è invece riferito al CHJ.

Vincoli della Propulsione Elettrica

La densità energetica delle batterie si attesta oggi tra 250 e 300 Wh/kg, a fronte dei circa 11.900 Wh/kg del cherosene Jet-A1. Tale divario implica che, per garantire un'autonomia equivalente a quella di un volo a medio raggio, la massa delle batterie necessarie supererebbe la capacità strutturale degli aeromobili convenzionali, rendendo indispensabile una riprogettazione. A differenza del carburante liquido, il cui consumo progressivo riduce la massa dell'aeromobile durante il volo migliorandone le prestazioni aerodinamiche, le batterie mantengono un peso costante dall'inizio alla fine della missione, penalizzando in modo permanente il rapporto spinta/peso e incrementando il consumo energetico complessivo[61].

Sinergia con le nuove architetture dei motori

L'efficienza dei combustibili di nuova generazione è strettamente correlata all'evoluzione delle tecnologie propulsive. Nel settore aeronautico, infatti, l'attenzione si concentra sulla ricerca di architetture di motore che riescano a massimizzare la riduzione delle emissioni. Alcuni dei programmi di sviluppo che si concentrano sull'aumento dell'efficienza termica e della propulsione sono il CFM RISE[15] (cfr. Figura 1.31) e l'UltraFan di Rolls-Royce[62] (cfr. Figura 1.32).

[61] *Adler E. J., Martins J. R. R. A., Energy demand comparison for carbon-neutral flight.*
[62] *Aviation Week, Rolls-Royce considers UltraFan development pause.*

L’impiego di materiali ultraleggeri e l’ottimizzazione del design dei combustori, oltre a vincolare il raggiungimento dell’efficienza desiderata, assicurano la compatibilità dei propulsori con miscele SAF ad alta concentrazione e il miglioramento del rendimento termodinamico.

Il programma CFM RISE punta a un incremento dell'efficienza termica del 20% rispetto agli attuali motori LEAP attraverso l'adozione di un'architettura a ciclo aperto con fan non carenate, compatibile con miscele SAF fino al 100%[15]. Analogamente, l'UltraFan di Rolls-Royce ha dimostrato in fase di test un rapporto superiore a qualsiasi motore attualmente in servizio, con potenziali riduzioni dei consumi fino al 25%. Entrambi i programmi confermano che i SAF rimarranno il vettore energetico primario per il lungo raggio oltre il 2050, mentre l'integrazione ibrido-elettrica sarà limitata ai segmenti regionali e di corto raggio nello stesso orizzonte temporale.



Figura 1.31: CFM RISE.
Fonte: ATAG Waypoint 2050 Third edition, 2026 report



Figura 1.32: Rolls-Royce UltraFan.
Fonte: Aviation Week, Rolls-Royce considers UltraFan development pause

1.6.2 Settore marittimo

Fuel agnosticism **e strategie di** ***retrofitting***

La transizione energetica non può dare per scontato un approccio improntato al *fuel agnosticism*, cioè alla considerazione di più soluzioni tecnologiche, e a massicci interventi

di *retrofitting*, cioè l'aggiornamento a livello tecnico delle navi della flotta già esistente. È importante evidenziare la longevità delle attuali imbarcazioni, che può arrivare fino al 2050, rendendo fondamentale l'adeguamento tecnico della flotta esistente per rispettare i limiti definiti dall'IMO e per preservare il valore degli asset[18].

Le previsioni indicano che la domanda di interventi di *retrofitting* potrebbe raggiungere un picco di 1700 unità annue entro il 2030. Tra le principali tecnologie di *retrofitting* troviamo anche un sistema di *carbon capture* on board (OCC). Le analisi DNV[18] evidenziano che l'installazione del sistema OCC sulle navi è fattibile, con requisiti di spazio simili a quelli dei serbatoi per il GNL.

L'aumento dell'efficienza energetica delle navi esistenti tramite sistemi di propulsione assistita dal vento (WAPS), oltre alle evoluzioni da un punto di vista meccanico, rappresenta una parte importante per la transizione di questo settore. Infatti, il 75% delle navi attuali può adottare operazioni di *retrofitting* e tecnologie come le vele a rotore o ad aspirazione, consentendo una riduzione dei consumi di carburante stimata tra il 5% e il 20%[18]. L'adozione di questi metodi permette alle compagnie navali di non investire su tecnologie ancora non del tutto mature, permettendo anche di sfruttare le lacune regolatorie nel quadro normativo internazionale per combinare l'uso di combustibili a basse emissioni con soluzioni di risparmio energetico e sequestro della CO_2.

La sfida futura sarà conciliare queste tecniche con lo sviluppo delle infrastrutture portuali, le quali sono essenziali sia per il bunkeraggio delle nuove fonti energetiche sia per lo sbarco dell'anidride carbonica catturata, condizioni indispensabili per il raggiungimento di una flotta a zero emissioni.

Elettrificazione e Infrastrutture di Supporto

L'utilizzo di energia elettrica nel comparto marittimo sta assumendo una rilevanza sempre maggiore ed esempi di questo fenomeno includono l'adozione di sistemi ibridi e pacchi batteria per l'ottimizzazione del carico dei motori o per la gestione delle manovre portuali. Le principali barriere riguardano l'utilizzo dell'elettrico per le lunghe tratte, in quanto la principale differenza tra i sistemi di accumulo elettrochimico e i combustibili tradizionali impone la riduzione dell'autonomia operativa, rendendo queste tecnologie inadeguate per le esigenze del trasporto d'alto mare[18].

I limiti spostano l'attenzione del settore verso gli *e-fuel*, la cui produzione però è soggetta a perdite termodinamiche durante le fasi di sintesi. A tal proposito, l'integrazione tecnologica più efficace nel breve periodo è rappresentata dallo *shore power*, il quale consente alle navi di disattivare i motori termici durante la sosta in banchina alimentandosi tramite la rete elettrica di terra.

La costruzione di queste infrastrutture è limitata dall'adeguamento tecnico dei sistemi a bordo delle navi e anche dalla necessità di investimenti a livello portuale per assicurare una fornitura energetica derivante esclusivamente da fonti rinnovabili.

L'efficienza di sistema, infine, risulta superiore se si utilizzano sistemi elettrici rispetto a combustibili sintetici e ciò è dovuto alle inevitabili perdite energetiche che caratterizzano i processi di elettrolisi e di sintesi chimica.

Sfide dell'Automazione e del Fattore Umano

L'introduzione dei sistemi WAPS pone sfide non banali riguardo alla loro integrazione con i sistemi di navigazione esistenti. Ad esempio, le vele a rotore di tipo Flettner generano forze laterali variabili in funzione del vento, le quali devono essere compensate in tempo reale dal sistema di governo, richiedendo algoritmi di controllo e sensori di vento ad alta frequenza. Dal punto di vista normativo, l'IMO non ha ancora emanato linee guida specifiche per la certificazione di questi sistemi in combinazione con motori a carburanti alternativi, creando un vuoto regolatorio che le compagnie devono gestire attraverso protocolli interni. Sul fronte della formazione, la DNV stima che entro il 2028 circa 33.000 marittimi necessiteranno di programmi di addestramento specialistico per la gestione di combustibili come metanolo e ammoniaca (cfr. Figura 1.33), in assenza di standard aggiornati che includano esplicitamente tali sostanze[18].

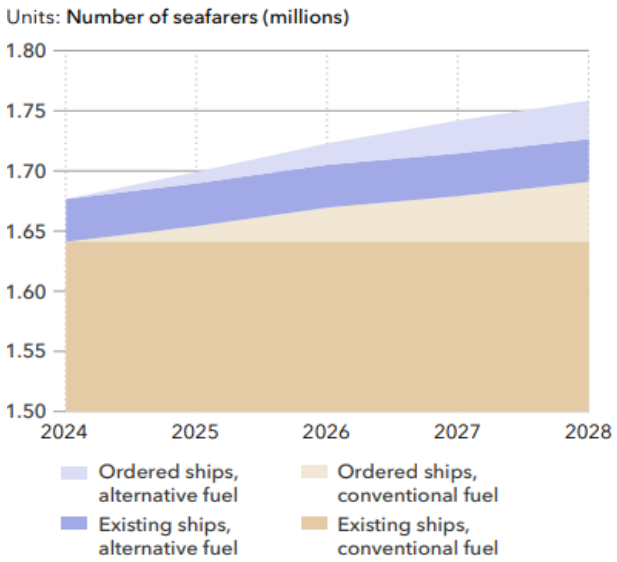


Figura 1.33: Previsione della necessità di formazione di personale marittimo.
Fonte: 2025 edition of the Maritime Forecast to 2050

1.7 Vincoli strutturali e criticità della transizione verso i carburanti sostenibili

Sebbene i carburanti sostenibili rappresentino una leva essenziale per la decarbonizzazione del trasporto aereo e marittimo, la loro diffusione su larga scala incontra una serie di vincoli strutturali che, almeno nel breve e medio periodo, ne limitano la capacità di sostituire i combustibili fossili. Tali vincoli non riguardano unicamente il prezzo finale del combustibile, ma investono l'intera architettura industriale della transizione, coinvolgendo la disponibilità e la qualità delle materie prime, la capacità produttiva installata, la maturità delle tecnologie, la costruzione delle filiere logistiche, la sicurezza operativa e la competizione tra usi alternativi delle medesime risorse.

Un primo profilo critico riguarda la disponibilità dei *feedstock* per i percorsi produttivi basati su biomasse, residui organici e rifiuti. La difficoltà non consiste soltanto nell'individuare materie prime teoricamente utilizzabili, ma anche nel verificare che queste ultime siano realmente disponibili in volumi adeguati (cfr. Figura 1.34), a costi sostenibili e senza generare effetti ambientali o socioeconomici negativi[63].

Biofuel	Feedstock	2030 Estimated advanced biofuel quantity (Mtoe)	2050 Estimated advanced biofuel quantity (Mtoe)
Hydrotreated Vegetable Oil /renewable diesel	Waste oils and fats	1.9	1.9
	Used Cooking Oil (UCO)	2.6	6.5
Biomethane	Sewage sludge	0.1 - 0.2	1.0 - 1.2
	Manure (solid and liquid)	1.1 - 1.3	0.4 - 0.4
	Agricultural residues (high moisture; sugar beet leaves, etc.)	0.1	0.1
Ethanol and hydrocarbons from Enzymatic hydrolysis & fermentation	Agricultural residues (straw-like)	21.0 - 25.3	N/A
	Lignocellulosic crops (grassy)	5.5 - 16.6	6.5 - 19.6
	Biowaste	9.2 -16.8	13.2 - 24.4
Fischer-Tropsch from Gasification + catalytic synthesis	Solid industrial waste (secondary agro and forest industries)	27.9 - 40.1	56.8 - 84.0
	Agricultural residues (straw-like)	N/A	54.4 - 62.4
	Agricultural (woody) & forestry residues	1 - 1.5	2.4 - 3.2
	Lignocellulosic crops (woody)	7.6 - 22.7	16.8 - 50.8
Total		**78.0 – 129.1**	**160.0 – 254.5**
Total Liquid advanced biofuel taking into account the total sustainable biomass for bioenergy		**76.7 - 127.5**	**158.5 – 252.8**
Average conversion yield on energy basis		**37%**	**70%**
Average conversion yield on dry mass basis		**15%**	**29%**

Figura 1.34: Quantità potenziali di biocarburanti avanzati per tipologia di feedstock al 2030 e al 2050, considerando le massime rese di processo e la totale disponibilità di biomassa sostenibile per bioenergia.
Fonte: UNCTAD, Review of Maritime Transport 2025

[63] *Cazzola, P., Gérard, F., Gorner, M., Gibbs, M., & Young, K., Assessment of the potential of sustainable fuels in transport, 2023*

1.7.1 Settore aeronautico

Nel caso dell'aviazione, la diffusione dei SAF risulta strettamente legata alla disponibilità di materie prime sostenibili, soprattutto nel breve periodo (cfr. Figure 1.35 e 1.36).

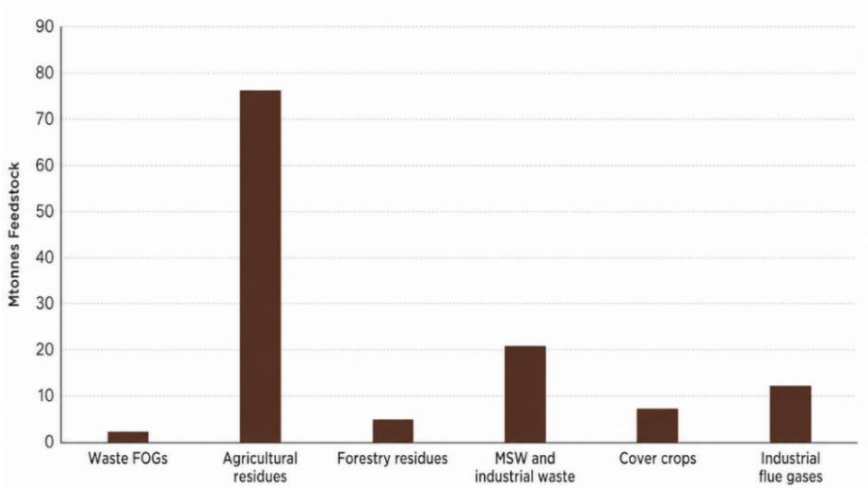


Figura 1.35: Materie prime per la produzione di SAF in EU28 al 2030.
Fonte: ICCT

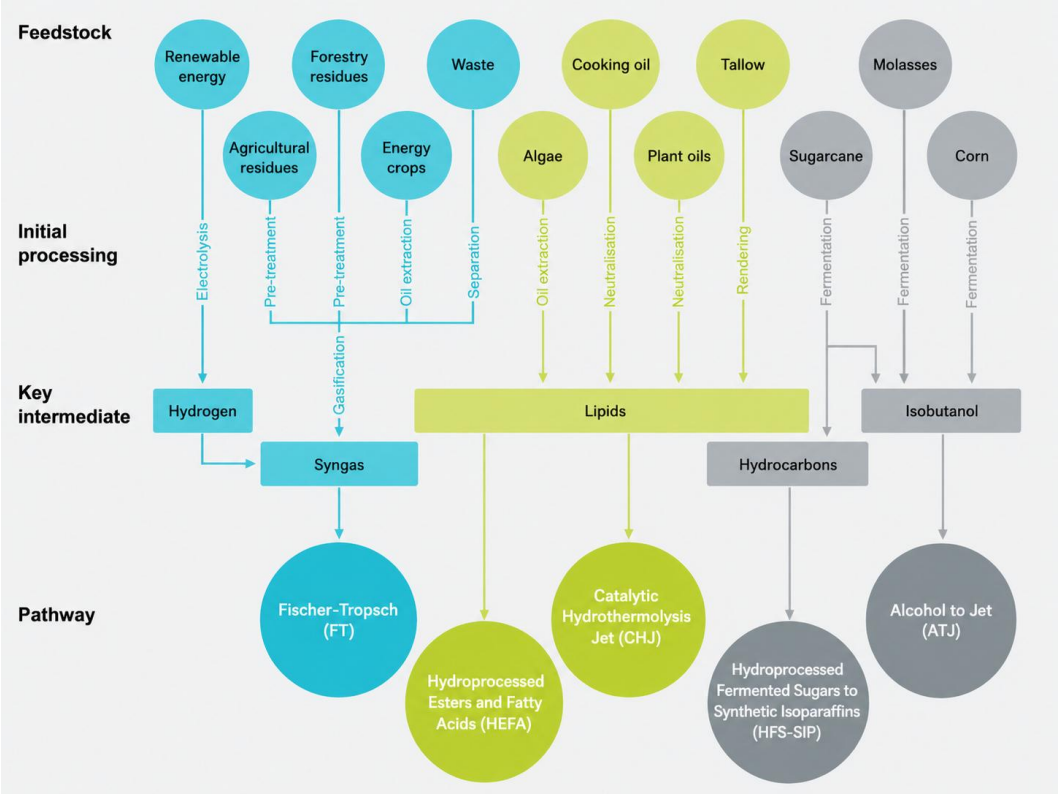


Figura 1.36: Materie prime e processi per la produzione di SAF.
Fonte: Sustainable aviation fuels: The best solution to decarbonize aviation?

La criticità dei *feedstock* assume, inoltre, anche una dimensione qualitativa oltre che quantitativa. Non tutte le biomasse presentano il medesimo profilo di sostenibilità e il ricorso a colture in competizione con la filiera alimentare o a materie prime associate a cambiamenti indiretti nell'uso del suolo può compromettere il beneficio ambientale complessivo del carburante prodotto. Il problema, pertanto, non riguarda solo l'abbondanza della materia prima, ma anche la sua effettiva idoneità a sostenere una transizione coerente con gli obiettivi climatici e ambientali. In questa prospettiva, il potenziale di lungo periodo dei carburanti sostenibili non potrà fondarsi su una singola base materiale, ma richiederà la coesistenza di una pluralità di *feedstock*, incluse biomasse residuali, rifiuti organici, CO_2 catturata e, soprattutto, grandi disponibilità di elettricità rinnovabile per la produzione di combustibili sintetici (cfr. Figura 1.37).

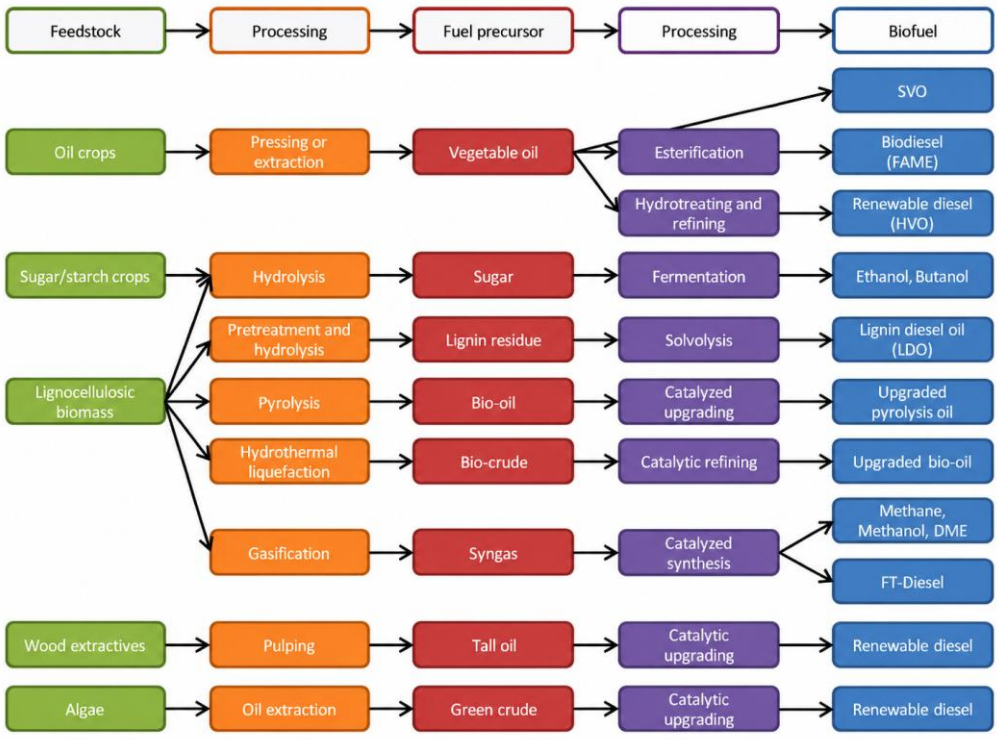


Figura 1.37: Materie prime e principali processi di conversione ad oggi disponibili per la produzione di biocombustibili.
Fonte: ETIP Bioenergy 2020

Un secondo vincolo riguarda la differenza di costo rispetto ai combustibili fossili convenzionali, differenza che continua a rappresentare una delle principali barriere alla diffusione dei carburanti sostenibili. Nel settore aeronautico, la disponibilità e il costo dei SAF sono oggi comunemente individuati tra i principali ostacoli al progresso della decarbonizzazione, evidenziando come il mercato continui a dipendere da meccanismi di *de-risking*, contratti di lungo termine e supporto pubblico per rendere bancabili i progetti di produzione. Anche nel contesto europeo, nonostante la crescita della domanda indotta dagli

obblighi normativi, il differenziale di costo rispetto al *Jet fuel* fossile continua a richiedere strumenti di sostegno, tra cui contratti per differenza, incentivi fiscali e altre forme di supporto economico, poiché il mercato non appare ancora in grado di assorbire autonomamente il *premium price* dei SAF.

Un ulteriore profilo di criticità riguarda la disponibilità effettiva dei carburanti sostenibili: anche quando la tecnologia di produzione è nota e il combustibile risulta qualificabile come sostenibile, la criticità principale resta la capacità di produrlo in volumi coerenti con la domanda attesa. Nel caso dei SAF, la produzione globale ha continuato fino a tempi recenti a rappresentare una quota estremamente ridotta del consumo complessivo di *Jet fuel* (cfr. Figura 1.38), evidenziando un marcato disallineamento tra gli obiettivi di decarbonizzazione e la realtà produttiva. Anche a livello nazionale, pur in presenza di piani di sviluppo e annunci di investimento, la capacità attesa resta contenuta rispetto al fabbisogno prospettico del settore. Tali analisi saranno svolte in maniera più approfondita nel Capitolo 2.

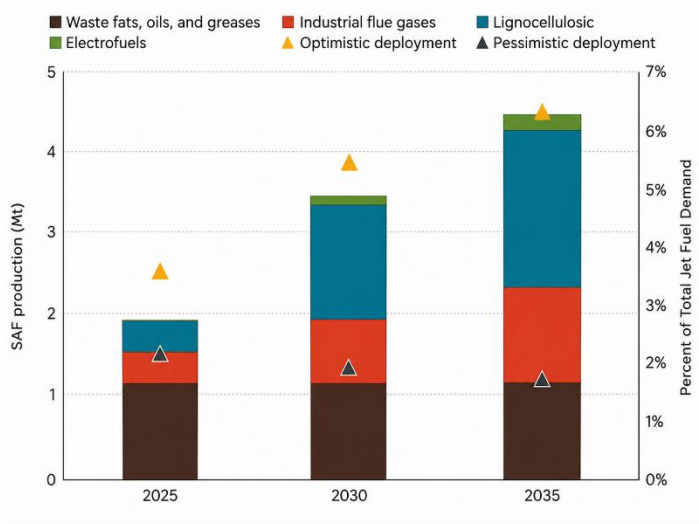


Figura 1.38: Confronto delle previsioni FTG per SAF in Mt nel 2035, per scenario e tipo di feedstock. Fonte: disponibilità di feedstock del World Economic Forum

Tale considerazione conduce direttamente al tema della scalabilità industriale: portare un *pathway* produttivo da una fase dimostrativa o iniziale a una dimensione compatibile con il fabbisogno dei trasporti internazionali richiede tempi lunghi, investimenti elevati e un ambiente regolatorio sufficientemente stabile. La questione non riguarda soltanto la costruzione di nuovi impianti, ma anche la possibilità di far evolvere filiere che oggi sono ancora frammentate, sperimentali o concentrate in pochi poli produttivi. In ambito aeronautico il problema si manifesta con particolare evidenza nei progetti *first-of-a-kind* e *second-of-a-kind*, i quali presentano profili di rischio elevati e richiedono forme di partenariato pubblico-privato, garanzie, incentivi e strumenti fiscali dedicati (cfr. Figura 1.39).

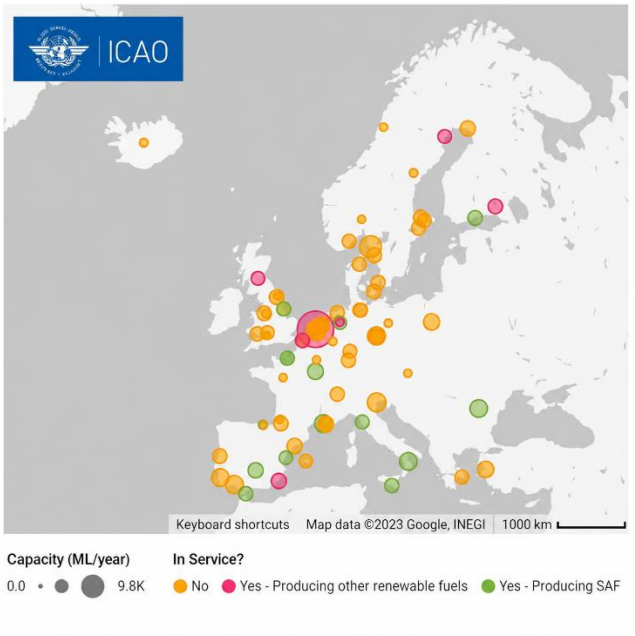


Figura 1.39: SAF Facilities Dashboard.
Fonte: ICAO

A ciò si collega il problema della *supply chain*, il quale costituisce una problematica a sé stante. Infatti, i carburanti sostenibili richiedono catene di approvvigionamento più articolate rispetto ai combustibili fossili tradizionali poiché implicano il coordinamento tra produttori di materie prime, impianti di conversione, infrastrutture logistiche, siti di miscelazione, sistemi di distribuzione e utenti finali. Nel caso dell'aviazione, la filiera dei SAF può prevedere più stadi di trasformazione e diversi punti potenziali di *blending*, mentre l'assenza, in molti casi, di piena integrazione con le infrastrutture esistenti rende particolarmente sensibili i costi di trasporto e distribuzione (cfr. Figura 1.40).

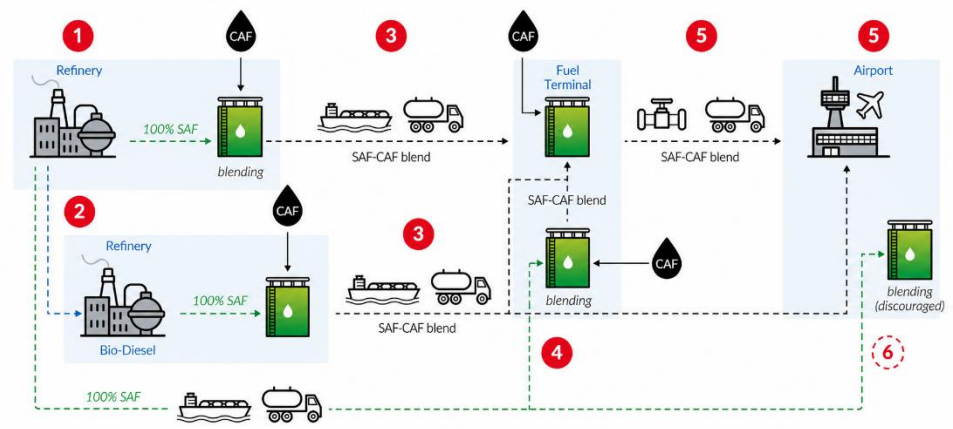


Figura 1.40: Schema della supply chain di SAF.
Fonte: Airports Council International e Aerospace Technology Institute, "Integration of sustainable aviation fuels into the air transport system"

Nel settore aeronautico, a tali criticità si aggiungono le barriere tecniche connesse ai processi di qualificazione dei nuovi carburanti. L'accesso al mercato richiede infatti procedure di test, validazione e certificazione complesse, che possono rallentare la diffusione di nuovi *pathway* produttivi e accrescere l'incertezza per gli operatori[64]. Tali strumenti non eliminano i vincoli strutturali della transizione, ma contribuiscono a ridurre le barriere tecniche all'ingresso e a rendere più ordinato il percorso di validazione industriale dei nuovi carburanti, iniziative analoghe sono state avviate anche in Europa e nel Regno Unito, come la EU SAF Clearing House, concepita come centro di competenze a supporto degli attori coinvolti nella filiera del SAF[65].

1.7.2 Settore marittimo

Nel trasporto marittimo, i vincoli strutturali della transizione assumono una configurazione in parte analoga e in parte specifica. Anche in questo caso, la disponibilità dei carburanti sostenibili dipende dall'accesso a *feedstock* e input energetici limitati, tuttavia la difficoltà del processo è accentuata dalla lunga vita utile delle navi, dall'eterogeneità delle flotte e delle rotte, nonché dal peso delle infrastrutture già esistenti. Il sistema marittimo è stato infatti ottimizzato per decenni attorno al paradigma dei combustibili fossili, caratterizzati da elevata densità energetica, basso costo relativo e facilità di stoccaggio, movimentazione e trasporto[66], qualità che invece i carburanti *green* non sempre garantiscono (cfr. Figura 1.41).

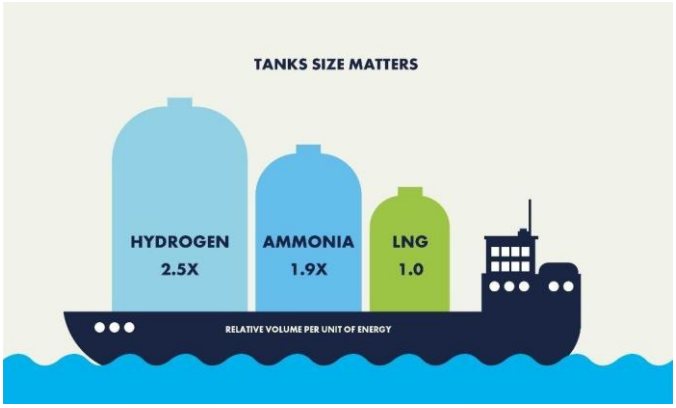


Figura 1.41: Densità energetica e caratteristiche fisiche dei combustibili.
Fonte: SEA-LNG, Understanding energy density of future fuels could be key to clearer decarbonization decision making

[64] *Federal Aviation Administration, ASTM D4054 Clearinghouse guide.*
[65] *EASA, Supporting scale up of sustainable aviation fuels through EU SAF Clearing House, 2024.*
[66] *Lloyd's Register & UMAS, Zero-emission vessels 2030: How do we get there?, 2018.*

Ne deriva che non esiste una soluzione univoca applicabile indistintamente all'intero settore poiché la convenienza dei diversi combustibili alternativi varia in funzione del tipo di nave, della distanza operativa, della disponibilità del vettore energetico, del costo atteso della riduzione delle emissioni, della maturità tecnologica e dello sviluppo delle infrastrutture di bunkeraggio (cfr. Figura 1.42).

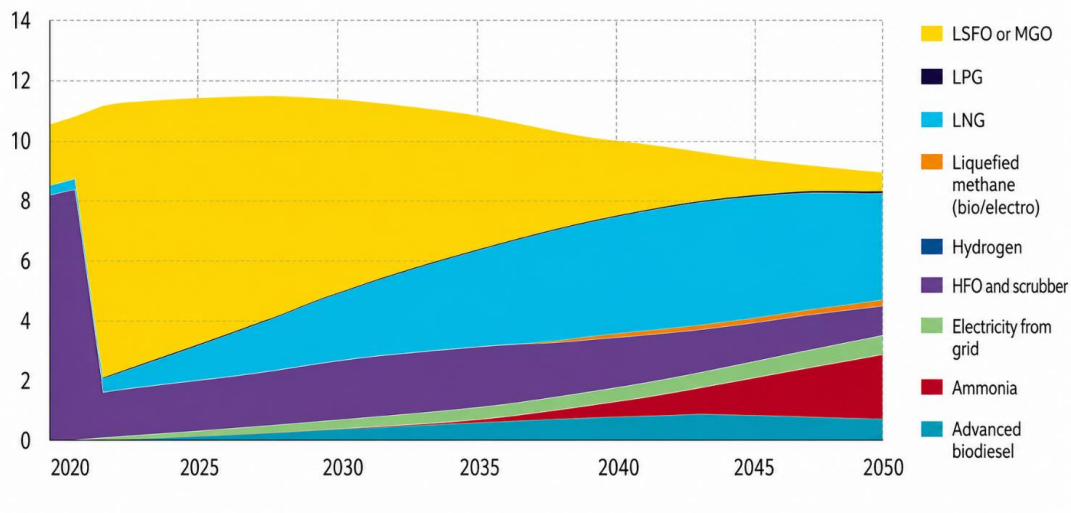


Figura 1.42: Evoluzione dell'uso energetico e del mix di combustibili nel trasporto marittimo (2018–2050) nello scenario coerente con gli obiettivi IMO.
Fonte: Ammonia Energy Association, All hands to the pump: Every stakeholder needed to support

La stessa letteratura sulla transizione marittima evidenzia che le prime opportunità di adozione dipendono congiuntamente dal costo e dalla disponibilità dei combustibili a zero emissioni scalabili e dalle caratteristiche geografiche e operative delle rotte considerate[67].

Ciò rende particolarmente difficile una sostituzione rapida e generalizzata delle soluzioni esistenti. La rete di produzione, distribuzione e bunkeraggio dei combustibili convenzionali è già pienamente sviluppata e dimensionata sulla domanda attuale (cfr. Figura 1.43), mentre i nuovi vettori richiedono investimenti coordinati in navi, porti, logistica e standard operativi.

[67] *Smith, T. et al., A strategy for the transition to zero-emission shipping: An analysis of transition pathways, scenarios, and levers for change. UMAS, Getting to Zero Coalition, Global Maritime Forum, Friends of Ocean Action, & World Economic Forum, 2021.*

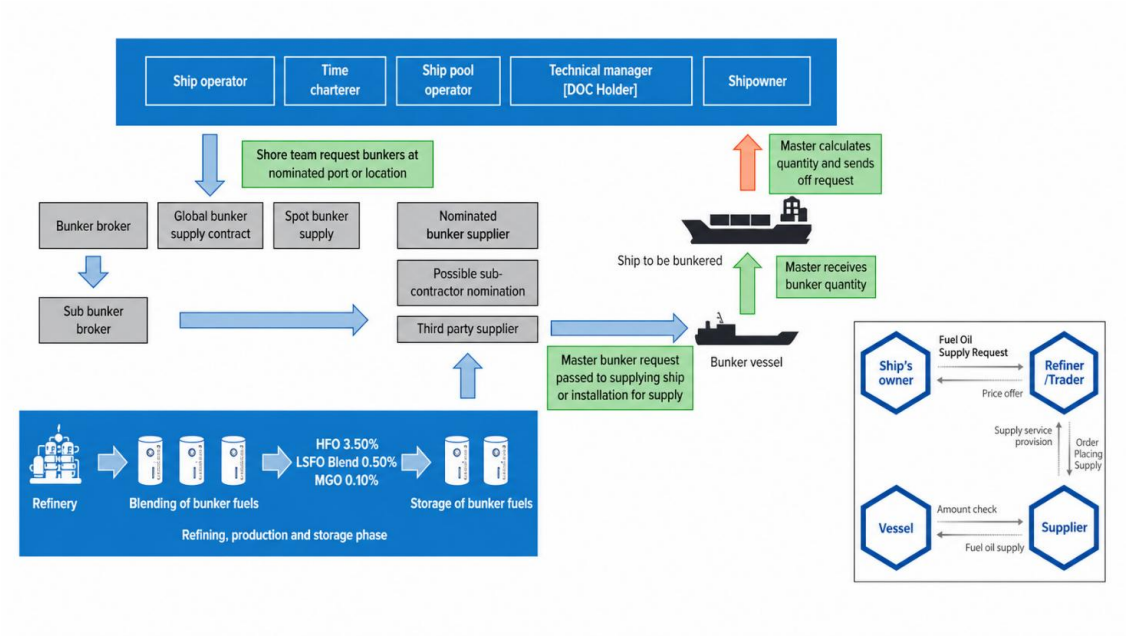


Figura 1.43: Flusso operativo e logistico della catena di fornitura dei combustibili marini.
Fonte: Best Practices for Fuel Oil Purchasers/Users

In questa prospettiva, molte opzioni a basse o nulle emissioni, pur promettenti sul piano climatico, restano ancora in una fase iniziale di penetrazione e necessitano di politiche pubbliche, segnali regolatori e strumenti economici capaci di ridurre il differenziale di costo rispetto ai combustibili fossili (cfr. Figura 1.44). Non è dunque sufficiente che un combustibile sia tecnicamente praticabile o ambientalmente desiderabile, ma esso deve anche risultare economicamente sostenibile per operatori inseriti in mercati competitivi e caratterizzati da margini differenziati[68]. Tale criticità emerge con particolare evidenza nel caso degli *e-fuels* e dell'e-metanolo, il cui impiego su scala presuppone grandi quantità di elettricità rinnovabile, capacità produttiva dedicata e meccanismi di sostegno in grado di colmare il divario rispetto ai combustibili convenzionali. Coerentemente, gli scenari di transizione marittima indicano la necessità di incentivi, *carbon pricing*, mandati sui combustibili e coordinamento tra asset terrestri e navali per rendere economicamente praticabile la diffusione dei nuovi vettori.

[68] *Baccelli, O., La decarbonizzazione del trasporto marittimo quale stimolo all'innovazione industriale e il ruolo delle Autorità di Sistema Portuale, 2025.*

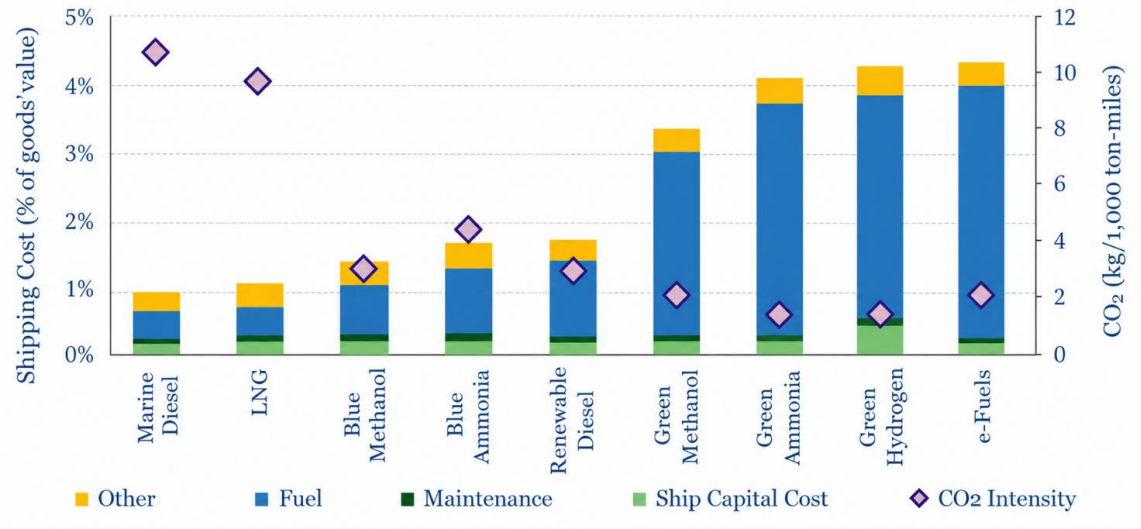


Figura 1.44: Confronto tra combustibili marittimi (costo vs emissioni).
Fonte: Thunder Said Energy. Decarbonize shipping: Alternative fuel costs

In tale contesto, l'LNG fossile continua a essere frequentemente interpretato come combustibile di transizione, venendo adottato nella maggioranza dei casi (cfr. Figura 1.45), poiché consente di sfruttare tecnologie e infrastrutture già più mature. Tuttavia, esso non configura una soluzione pienamente coerente con un percorso di neutralità climatica, soprattutto se valutato lungo l'intero ciclo di vita.

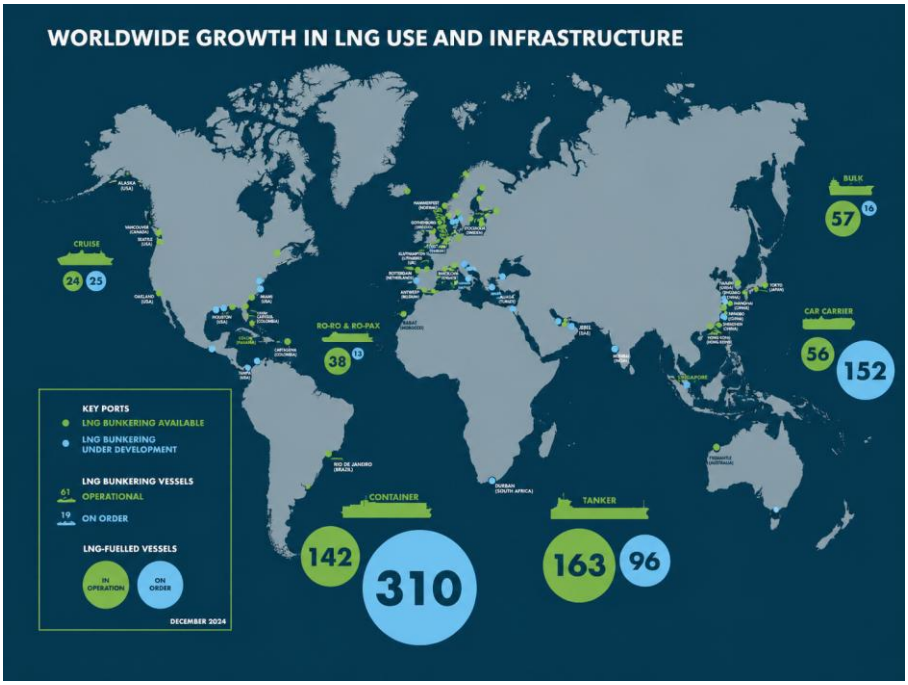


Figura 1.45: Crescita della flotta alimentata a LNG e sviluppo dell'infrastruttura di bunkering LNG nel trasporto marittimo.
Fonte: SEA-LNG. (2025, January 23). Focus on practicality drives LNG pathway growth in 2024

Parallelamente, la diffusione di metanolo, ammoniaca, idrogeno ed *e-fuels* non dipende soltanto dalla compatibilità tecnica con le navi, ma anche dalla disponibilità di volumi adeguati lungo le principali rotte commerciali e da una logistica di bunkeraggio coerente con i fabbisogni operativi del naviglio. Anche assumendo la maturità delle tecnologie di produzione, la transizione implica infatti una mobilitazione significativa di capitale, capacità industriale e competenze, oltre alla costruzione di nuovi impianti e infrastrutture energetiche.

Sotto un ulteriore profilo la sicurezza assume una rilevanza trasversale e crescente: la diffusione dei combustibili alternativi non dipende unicamente dalla loro disponibilità fisica o dal loro rendimento tecnico, ma anche dalla possibilità di garantire qualità del prodotto, operabilità dei motori, sicurezza nelle operazioni di bunkeraggio e condizioni di impiego compatibili con l'ambiente operativo. Ciò vale sia per i biocarburanti già disponibili, che possono presentare criticità legate alla stabilità, alla contaminazione o alla compatibilità con i sistemi esistenti in misura ancora più marcata, sia per i combustibili di nuova generazione. L'ammoniaca, pur essendo considerata una delle opzioni più promettenti per il lungo raggio in ragione dell'assenza di carbonio nella molecola, presenta rilevanti profili di tossicità, così come il metanolo. L'idrogeno, invece, richiede standard stringenti per l'elevata infiammabilità e per le condizioni di stoccaggio. Ne consegue che la transizione marittima non richiede solamente nuovi combustibili, ma una più ampia riconfigurazione tecnica, normativa e organizzativa della sicurezza, capace di accompagnare l'introduzione dei nuovi vettori lungo l'intera catena del valore.

Nel complesso, i carburanti sostenibili non possono essere considerati una soluzione priva di criticità per la decarbonizzazione dei trasporti aereo e marittimo. Essi sono elemento centrale di una transizione che si confronta con vincoli materiali, industriali, logistici, economici e di sicurezza di notevole intensità e, proprio per questo, il loro sviluppo non può essere valutato soltanto in termini tecnologici, ma richiede una riflessione più ampia sulle condizioni normative ed economiche necessarie a sostenerne la diffusione. Tale profilo sarà oggetto del capitolo successivo, dedicato al quadro regolatorio e agli strumenti economici per l'introduzione dei carburanti sostenibili.

Capitolo 2: Il quadro normativo ed economico per l'introduzione dei carburanti sostenibili nei trasporti aereo e marittimo

2.1 La governance della decarbonizzazione nei trasporti aereo e marittimo

Il Protocollo di Kyoto del 1997 è stato il primo accordo internazionale a stabilire obiettivi vincolanti di riduzione delle emissioni a livello giuridico per i paesi industrializzati. L'Accordo di Parigi del 2015, successivamente, ha rafforzato l'attenzione a livello globale, ponendo l'obiettivo di mantenere l'aumento della temperatura media globale al di sotto dei 2 °C rispetto ai livelli preindustriali, cercando di limitare tale incremento a 1,5 °C [69] [70] (cfr. Figura 2.1).

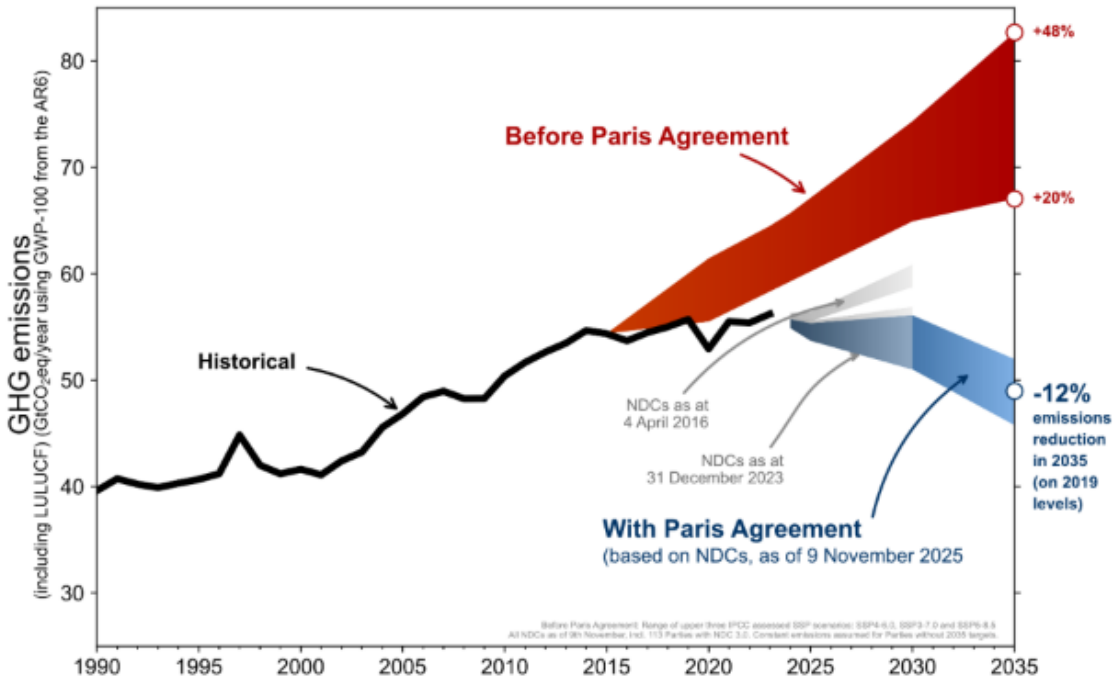


Figura 2.1: Aumento delle emissioni con e senza l'Accordo di Parigi.
Fonte: UNFCCC NDC Synthesis Report 2025

L'Accordo di Parigi impone, a ciascuna delle nazioni che lo hanno sottoscritto, la comunicazione dei propri contributi determinati a livello nazionale (NDC), al fine di monitorare il raggiungimento degli obiettivi prefissati. Gli NDC sono uno dei punti

[69] *MASE, L'Accordo di Parigi, 2015.*
[70] *MASE, Protocollo di Kyoto, 1997.*

fondamentali per le strategie di mitigazione e adattamento di ciascun Paese, e devono essere una progressione costante rispetto agli impegni precedenti[71].

L'integrazione dei due settori, aereo e marittimo, all'interno degli NDC deve affrontare il problema dell'attribuzione geografica delle emissioni.

L'asimmetria emerge nei contesti in cui il trasporto internazionale opera in assenza di un'attribuzione giuridica chiara delle emissioni. Storicamente le principali criticità hanno riguardato la vendita del carburante, che attribuisce le emissioni al Paese in cui la nave o l'aereo effettua il rifornimento, e il criterio della rotta, secondo cui le emissioni vengono ripartite tra il Paese di partenza e quello di destinazione[72].

I problemi sulla vendita rischiano di penalizzare ingiustamente i grandi *hub* logistici e di rifornimento, mentre quelli sulla rotta richiedono attenzione specifica e una collaborazione per la condivisione dei relativi dati.

Le linee guida IPCC per gli inventari nazionali classificano i *bunker fuel* come categoria separata, su indicazione UNFCCC, togliendoli dagli inventari nazionali per evitare doppie contabilizzazioni o omissioni[73].

La gestione delle emissioni non territoriali è un punto importante per quanto riguarda la governance climatica. Il Protocollo di Kyoto classifica le emissioni in territoriali, prodotte all'interno dei confini di uno Stato, e internazionali, generate da attività che non appartengono a nessun paese specifico, come i voli e le rotte marittime che attraversano più giurisdizioni. Le prime sono di responsabilità dei singoli Stati, le seconde invece sono escluse dagli obiettivi di riduzione nazionali, e nessun Paese ha l'obbligo di contabilizzarle o ridurle. La regolamentazione di queste emissioni veniva invece delegata all'ICAO per l'aviazione e all'IMO per il trasporto marittimo.

La differenziazione tra emissioni territoriali e internazionali ha fatto sì che le emissioni dovute all'aereo e al marittimo passassero in secondo piano[72].

I dati recenti riportano una tendenza da parte delle nazioni alla reintegrazione di questi due settori negli obiettivi nazionali per la riduzione delle emissioni; infatti, circa il 6% delle nazioni ha iniziato a includere esplicitamente l'aviazione e la navigazione internazionale nei propri settori di rilevanza nazionale. Il settore marittimo, nello specifico, ha ricevuto un'attenzione particolare con il 78% dei nuovi NDC che includono riferimenti espliciti agli oceani. Le misure mirate alla decarbonizzazione del trasporto marittimo (cfr. Figura 2.2) richiedono combustibili a basse emissioni e lo sviluppo di infrastrutture portuali ecosostenibili[74].

---

[71] *UNDP, NDC Insight Series, 2026.*

[72] *NewClimate Institute, The impact of international aviation and shipping on national climate targets, 2023.*

[73] *IPCC (2006/2024 aggiornamento), Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.*

[74] *UNFCCC, NDC Report, 2025.*

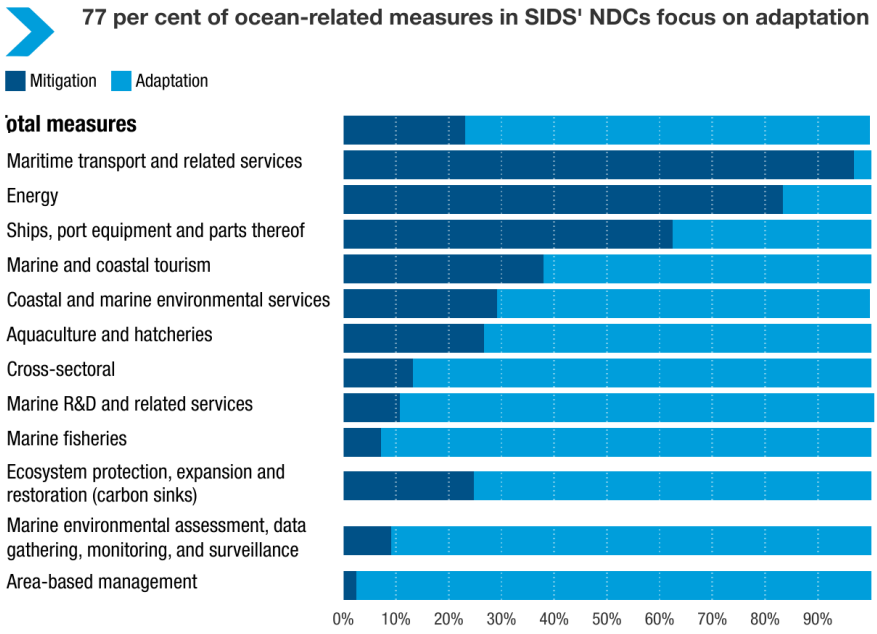


Figura 2.2: Ripartizione delle misure legate agli oceani all'interno degli NDC.
Fonte: UNCTAD's analysis

Innovazione sistemica e regolamentazione

La regolamentazione della decarbonizzazione nei trasporti non può limitarsi all'imposizione di vincoli o target emissivi, ma deve svolgere una funzione abilitante rispetto all'innovazione tecnologica. La transizione energetica richiede infatti il coordinamento di carburanti sostenibili, infrastrutture, operatori, standard tecnici, criteri di sicurezza e sistemi di certificazione.

In questa prospettiva, i mandati per l'utilizzo di combustibili alternativi rappresentano solo una parte di un processo più ampio. Senza un quadro normativo armonizzato, l'innovazione rischierebbe di restare frammentata e limitata a singoli operatori o specifiche aree geografiche, senza produrre effetti sistemici.

Anche la digitalizzazione assume un ruolo rilevante, poiché consente di ottimizzare rotte, operazioni infrastrutturali e scambio di informazioni tra mezzi, nodi logistici e fornitori di servizi. La sfida della governance consiste quindi nel creare le condizioni affinché innovazione tecnologica, infrastrutture e mercato operino in modo coordinato, rendendo la decarbonizzazione tecnicamente, economicamente e logisticamente realizzabile.

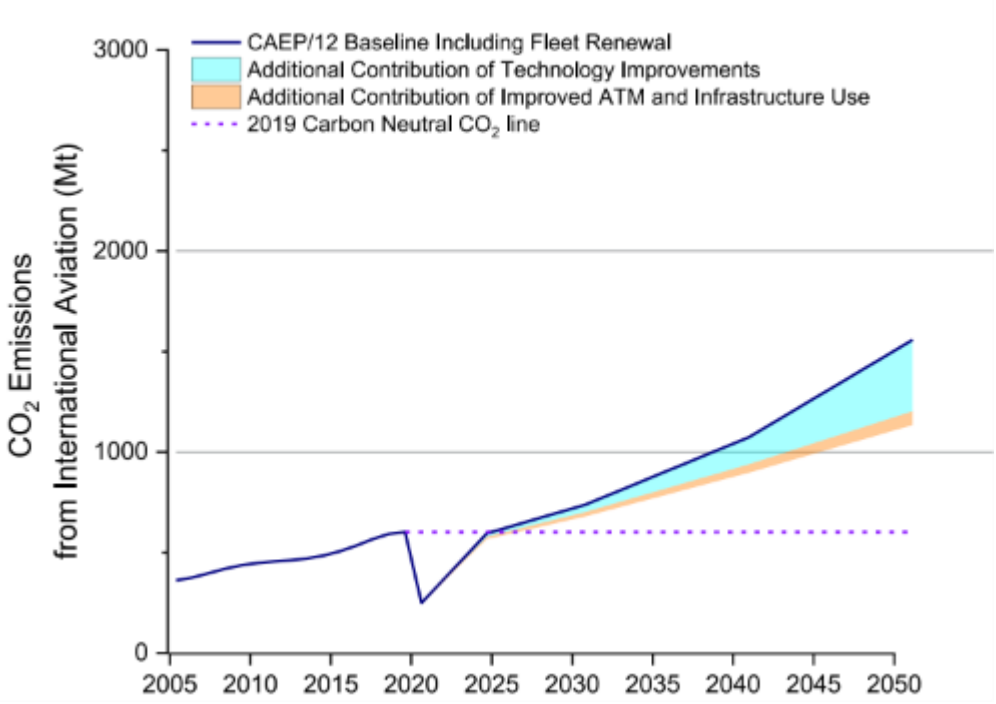


Figura 2.3: Contributo delle tecnologie nella riduzione delle emissioni.
Fonte: ICAO LTAG (Long-Term Aspirational Goal) Report A

2.1.1 Settore aeronautico

Il carattere transfrontaliero e il *Level Playing Field*

La necessità di un quadro di governance capace di garantire un *level playing field*, ossia condizioni di concorrenza equilibrate tra tutti gli operatori del settore, risulta fondamentale per salvaguardare la competitività del comparto aeronautico.

La frammentazione delle normative ambientali a livello regionale potrebbe comportare delle distorsioni di mercato, poiché le compagnie soggette a normative locali più stringenti subirebbero uno svantaggio competitivo rispetto alle compagnie che operano dove gli standard sono più bassi. In secondo luogo, il problema incentiverebbe il fenomeno di *carbon leakage* e la scelta strategica di *hub* con costi ambientali inferiori[22].

Un possibile esempio di queste dinamiche è quello del *fuel tankering*, che verrà successivamente illustrato nel paragrafo 2.3.1.

Il principio *Well-to-Wake* (WtW)

Il principio *Well-to-Wake*, già introdotto nel Capitolo 1, stabilisce che la riduzione delle emissioni debba essere valutata lungo l'intero ciclo di vita del carburante. Tale impostazione risulta coerente con l'obiettivo del quadro regolatorio europeo di disciplinare tutte le fasi della catena del valore, al fine di ridurre l'impatto ambientale complessivo.

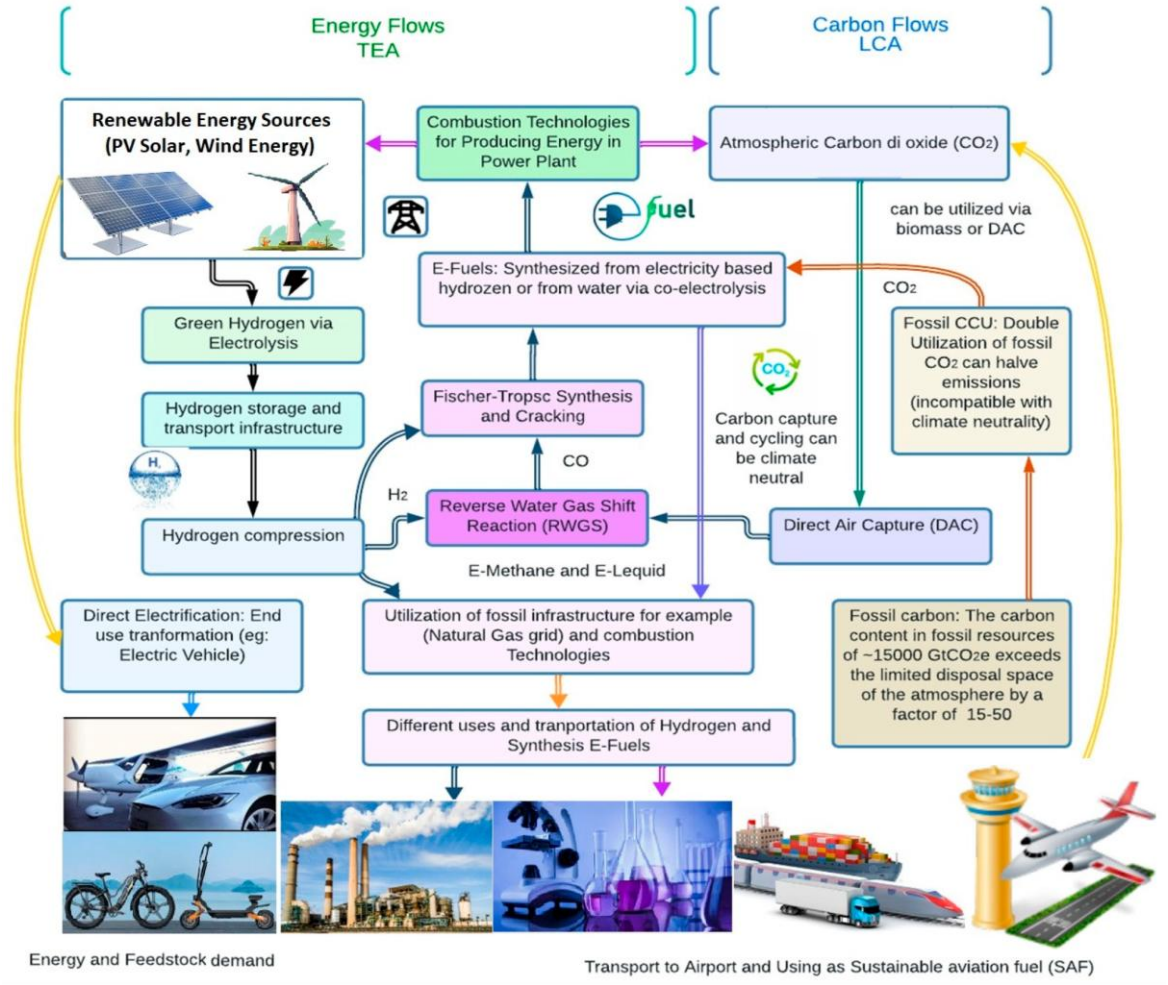


Figura 2.4: Confronto del ciclo di vita Well-to-Wake (WtW) tra carburanti fossili convenzionali e Sustainable Aviation Fuels (SAF).
Fonte: ICAO Environment Report

2.1.2 Settore marittimo

Il carattere transfrontaliero e il *Level Playing Field*

Analogamente a quanto avviene per il settore dell'aviazione, la competitività del settore marittimo è fortemente dipendente dai differenti quadri normativi delle diverse nazioni, nei quali la strategia principale consiste nell'implementazione di misure globali che garantiscano un *level playing field* indipendentemente dalla bandiera della nave. Il settore, senza uno standard uguale per tutte le nazioni definito dall'IMO, rimarrebbe vulnerabile al fenomeno delle bandiere di comodo. Le compagnie potrebbero infatti essere incentivate a registrare le proprie flotte in nazioni con obblighi di decarbonizzazione nulli o meno stringenti rendendo inutili gli sforzi ambientali collettivi[34].

Il *carbon leakage* e la deviazione delle rotte costituiscono un altro potenziale rischio. Ciò accade perché l'adozione di normative regionali isolate, se non armonizzate a livello internazionale dall'IMO, potrebbe incentivare i vettori a modificare i propri itinerari verso porti meno regolamentati per evitare i costi legati alle emissioni (cfr. Figura 2.5).

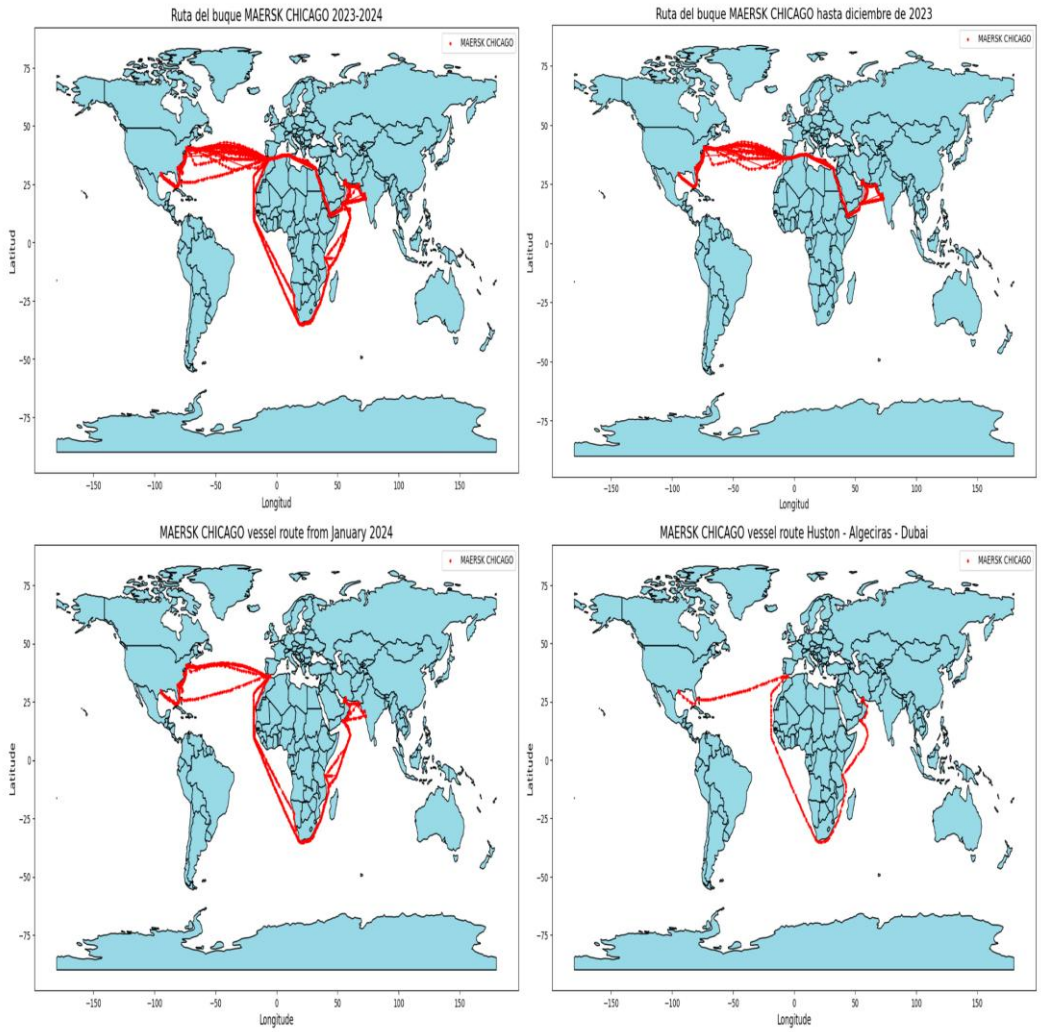


Figura 2.5: Rappresentazione del potenziale Carbon Leakage e della deviazione delle rotte marittime verso hub meno regolamentati in assenza di uno standard globale IMO.
Fonte: IMO (2023), Report on the Comprehensive Impact Assessment of potential IMO GHG reduction measures

I porti e gli operatori che investono in tecnologie a basse emissioni rischierebbero di essere penalizzati da tali dinamiche, poiché si troverebbero a sostenere costi di transizione più elevati rispetto ai concorrenti operanti in contesti meno regolamentati. Ciò porterebbe a una penalizzazione degli attori del sistema più virtuosi. Inoltre, in assenza di un coordinamento internazionale efficace, non si avrebbe una reale riduzione delle emissioni complessive, ma soltanto il loro spostamento da una regione a un'altra[2].

Dunque, la transizione ecologica deve essere supportata da meccanismi di mercato globali che evitino oneri economici sproporzionati e garantiscano che la decarbonizzazione sia uno stimolo, piuttosto che un fattore di esclusione per gli operatori che sono in regola con gli standard più elevati[68].

Il principio *Well-to-Wake* (WtW)

Il WtW è parte integrante del Regolamento (UE) 2023/1805 (FuelEU Maritime)[33], analizzato nel paragrafo 2.3.2. Il quadro normativo europeo e le linee guida dell'IMO stabiliscono che la misurazione delle emissioni deve guardare l'intera filiera attraverso due fasi principali:

- *Well-to-Tank*: include tutte le emissioni generate dall'estrazione delle materie prime, dalla produzione, dal trasporto e dalla distribuzione del combustibile fino al suo caricamento nei serbatoi della nave;
- *Tank-to-Wake*: emissioni prodotte dalla combustione o dall'uso del carburante a bordo durante le operazioni marittime e all'ormeggio[53].

2.2 Il ruolo delle organizzazioni internazionali: ICAO, il sistema CORSIA e IMO

La governance climatica globale per i settori dei trasporti internazionali è articolata attraverso una serie di deleghe di competenze da parte delle Nazioni Unite. La gestione tecnica e normativa delle emissioni derivante dai combustibili dell'aviazione e del marittimo internazionale, nonostante l'Accordo di Parigi stabilisca un quadro generale per la risposta della minaccia ai cambiamenti climatici, è affidata rispettivamente all'Organizzazione Internazionale dell'Aviazione Civile (ICAO) e all'Organizzazione Marittima Internazionale (IMO).

Il ruolo è sia quello consultivo che legislativo, definendo standard e pratiche raccomandate che gli Stati membri sono chiamati a integrare nei propri ordinamenti.

2.2.1 Settore aeronautico

L'ICAO

L'Organizzazione Internazionale dell'Aviazione Civile ha un ruolo fondamentale nella governance del settore aereo, essendo il principale attore per quanto concerne la definizione di standard tecnici e ambientali a livello globale. Uno degli strumenti normativi principali è

l'Annex A16 della Convention on International Civil Aviation[75], il quale stabilisce norme internazionali e pratiche raccomandate (SARPs) che coprono diversi aspetti dell'impatto ambientale. Le restrizioni coprono dal rumore degli aeromobili (Vol. I) alla certificazione delle emissioni dei motori (Vol. II), fino alla gestione del sistema CORSIA (Vol. IV).

Tra le strategie ICAO è possibile trovare anche i Long-term Global Aspirational Goal (LTAG)[76], che orienta gli Stati membri e l'industria a lavorare congiuntamente per raggiungere emissioni nette di carbonio pari a zero entro il 2050.

A differenza degli standard contenuti negli Annex della Convenzione di Chicago[77] o delle norme MARPOL[17] per il settore marittimo, l'LTAG non impone obblighi giuridicamente vincolanti per i singoli Stati membri, né prevede sanzioni in caso di mancato raggiungimento dei target. L'obiettivo perseguito è piuttosto quello di definire un quadro d'azione collettivo e un segnale politico per il settore, lasciando ai governi la flessibilità di contribuire in base alle proprie capacità nazionali e circostanze specifiche[76].

Il raggiungimento di questo traguardo si basa su un approccio su più fattori (cfr. Figura 2.6), che include l'accelerazione dell'innovazione tecnologica (come descritto precedentemente), il miglioramento dell'efficienza operativa e la produzione e l'adozione su larga scala di carburanti per l'aviazione sostenibili e a basse emissioni di carbonio.

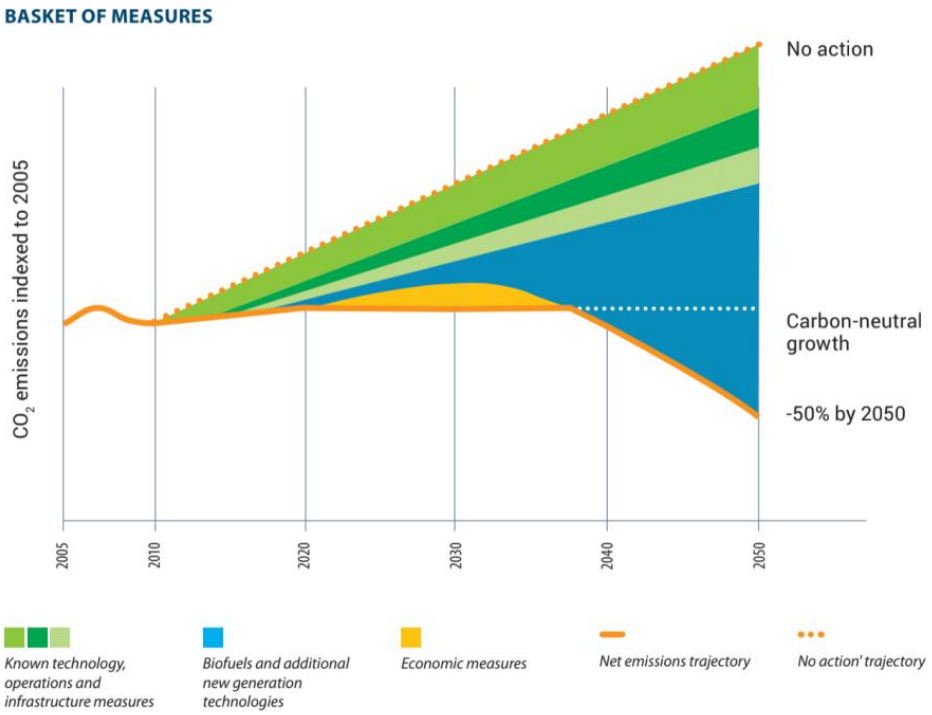


Figura 2.6: I pilastri strategici per la riduzione delle emissioni nel settore aeronautico.
Fonte: ICAO Environmental Report

[75] *ICAO, Annex 16 to the Convention on International Civil Aviation — Environmental Protection.*
[76] *ICAO, LTAG Nature and Scope of the Goal, 2022.*
[77] *ICAO, Convenzione di Chicago, 1944.*

Il sistema CORSIA

CORSIA rappresenta il primo meccanismo a livello globale per il pricing del carbonio, con l'obiettivo di compensare la crescita delle emissioni di CO_2 dell'aviazione internazionale rispetto ai livelli del 2019.

Il sistema è stato introdotto per gestire a livello globale la crescita delle emissioni dell'aviazione internazionale e ridurre il rischio di frammentazione regolatoria (cfr. Figura 2.7). L'obiettivo di CORSIA è stabilizzare le emissioni, evitando che l'introduzione di tasse o schemi di compensazione locali determini una duplicazione dei costi per le compagnie e, al contempo, assicurare che le emissioni siano contabilizzate una sola volta[78].

In questo contesto, i carburanti idonei per CORSIA devono garantire una riduzione di almeno il 10% delle emissioni di gas serra nel loro ciclo di vita rispetto al quantitativo dei combustibili fossili, includendo non solo la combustione ma anche l'estrazione, il trasporto e il processo di raffinazione.

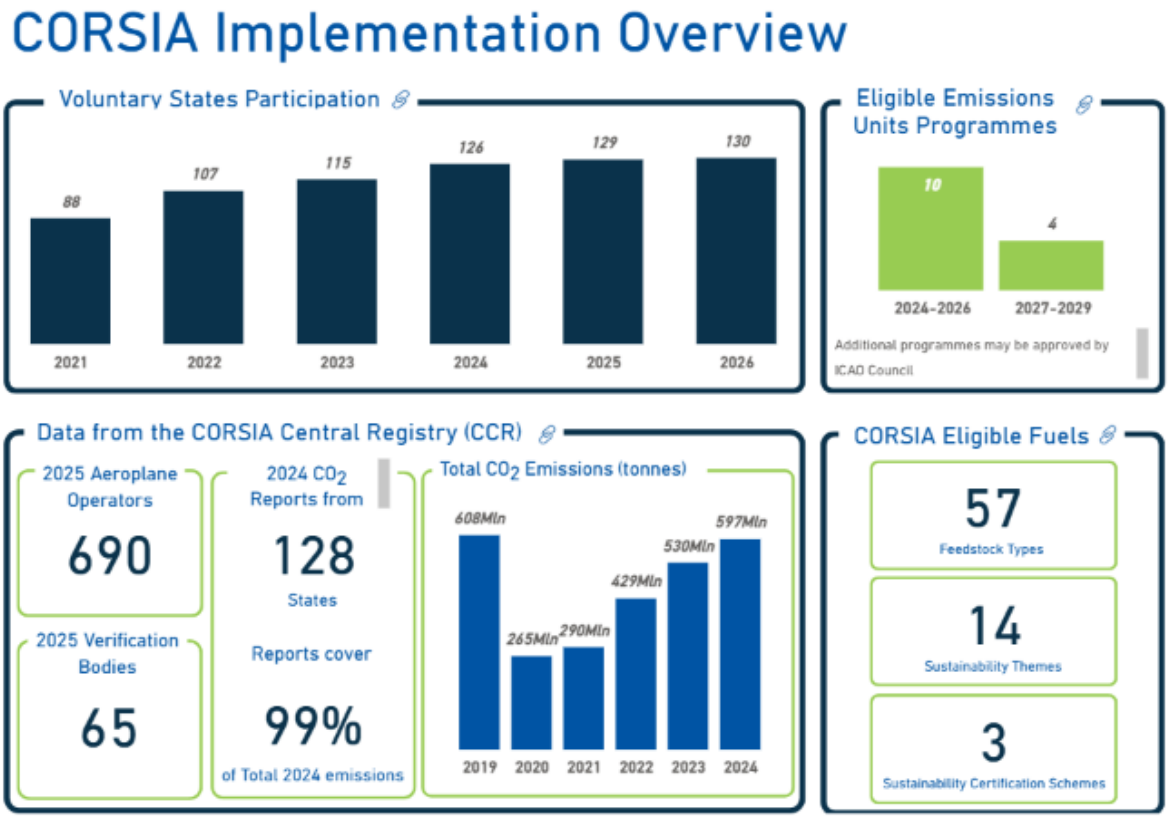


Figura 2.7: Stato di implementazione di CORSIA.
Fonte: IATA

[78] *ICAO, "CORSIA Eligible Fuels - Life Cycle Assessment Methodology", 2025.*

La definizione di standard globali per il calcolo del ciclo di vita delle emissioni (LCA) e l'adozione di criteri di sostenibilità uniformi permettono di riconoscere i benefici ambientali dei SAF in modo coerente in tutto il mondo, garantendo che investire in tecnologie *green* non diventi eccessivamente dispendioso e preservano sia il concetto della decarbonizzazione sia l'efficienza operativa del settore[78].

Il funzionamento segue una *baseline* per quanto riguarda le emissioni, ossia una soglia di riferimento oltre la quale scatta l'obbligo di compensazione. Tale baseline era originariamente fissata al 100% delle emissioni del 2019. Tuttavia, a seguito della decisione presa dalla 41ª assemblea ICAO, a partire dal 2024, e fino al 2035, è stata ridotta all'85%[79] delle emissioni del 2019 (cfr. Figura 2.8).

La riduzione della *baseline* sottolinea un inasprimento nel sistema. Ridurre la soglia, infatti, significa che le compagnie aeree sono chiamate a compensare una quota maggiore di emissioni poiché l'obbligo di *offsetting* scatta prima rispetto al piano originale.

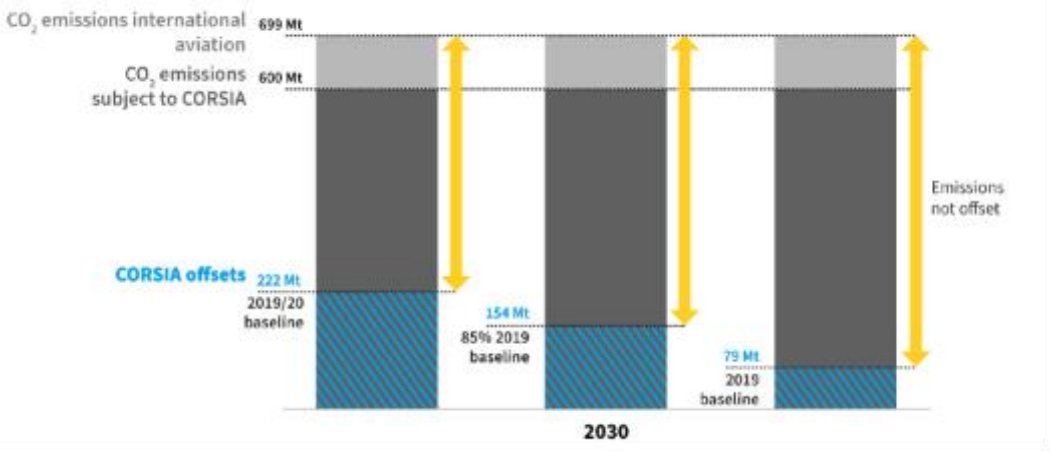


Figura 2.8: Analisi comparativa dell'impatto delle diverse baseline CORSIA sulle proiezioni al 2030. Fonte: Transport and Environment, 2022

La necessità di allineare il settore aereo agli obiettivi dell'Accordo di Parigi viene sottolineata con questa riduzione delle soglie, trasformando CORSIA da uno strumento di stabilizzazione delle emissioni a un meccanismo che incentiva attivamente la riduzione dei gas serra, rendendo più oneroso il mantenimento di tecnologie ad alto impatto carbonico[79].

Gli operatori aerei sono tenuti a coprire le emissioni che superano le *baseline* attraverso due strumenti distinti:

- il primo utilizza i CORSIA Eligible Fuels (CEF), ovvero i SAF e i LCAF certificati secondo la metodologia LCA di ICAO, necessari per riconoscere le riduzioni di emissioni lungo il ciclo di vita del carburante[78];

[79] *IATA, Fact Sheet: CORSIA and the 85% Baseline, 2024.*

- il secondo strumento è rappresentato dall'acquisto e dalla cancellazione di CORSIA Eligible Emissions Units, vale a dire crediti di carbonio provenienti da programmi che generano unità corrispondenti a riduzioni, evitamenti o rimozioni di emissioni e che soddisfano i criteri di eleggibilità CORSIA[22].

CORSIA, inoltre, non copre le operazioni di aviazione domestica, le quali rimangono soggette all'azione dei vari Stati nell'ambito dei contributi determinati a livello nazionale (NDC) previsti dall'Accordo di Parigi[72].

CORSIA è strutturato in varie fasi, pensate per prendere in considerazione le diverse circostanze e capacità dei vari Stati, in particolar modo di quelli in via di sviluppo.

La fase pilota, compresa tra il 2021 e il 2023, ha avuto carattere volontario per gli Stati: ciascun Paese membro dell'ICAO poteva infatti scegliere se aderire o meno al meccanismo. Tuttavia, per i voli internazionali operati tra Stati partecipanti, le compagnie aeree erano soggette agli obblighi previsti da CORSIA. La pandemia di COVID-19 ha avuto delle ripercussioni sull'aviazione internazionale, le emissioni del settore si sono mantenute al di sotto della *baseline* per l'intera durata di questa fase, con la conseguenza che nessun obbligo ha trovato applicazione nel periodo considerato.

La fase successiva tra il 2024 e il 2026 continua a mantenere una struttura prevalentemente volontaria, pur introducendo il meccanismo di *offsetting*, precedentemente citato. Il numero degli Stati partecipanti è cresciuto da 88 nella fase 2021-2023 fino a 115 nel 2023 e a 130 nella fase successiva.

La fase che partirà dal 2027 vedrà il meccanismo diventare obbligatorio per tutti i voli internazionali, con la sola eccezione di quelli da e verso i Paesi meno sviluppati, i piccoli Stati insulari in via di sviluppo, i Paesi in via di sviluppo senza sbocco sul mare, a meno che questi non scelgano volontariamente di aderire[79].

CORSIA avrà un ruolo sempre più rilevante quando le emissioni inizieranno a salire sopra i livelli pre-Covid-19. Entro il 2050, il fabbisogno complessivo di misure basate sul mercato per compensare le emissioni residue potrebbe oscillare tra 400 e 1.350 $MtCO_2$, a seconda dello scenario di decarbonizzazione realizzato. Nel breve-medio periodo, CORSIA costituisce uno strumento per il raggiungimento dell'obiettivo di crescita *carbon-neutral*, in attesa che SAF e nuove tecnologie raggiungano la scala necessaria a incidere sulle emissioni del settore[22].

2.2.2 Settore marittimo

L'International Maritime Organization (IMO)

L'IMO è l'autorità globale per la definizione degli standard relativi alla sicurezza, alla protezione e alle prestazioni del trasporto marittimo. L'obiettivo di questa autorità è salvaguardare l'ambiente cercando di instaurare un sistema normativo equo ed efficace che non minacci la competitività nel settore[80] [81].

Il Comitato per la Protezione dell'Ambiente Marino (MEPC) è il principale organo dell'IMO, con l'incarico di esaminare tutte le questioni che rientrano nell'ambito della prevenzione e controllo dell'inquinamento. Il MEPC è composto da tutti gli Stati membri ed è assistito da sottocomitati tecnici e gruppi di lavoro che si occupano di questioni specifiche, come la riduzione dei gas serra. Il suo compito è di individuare e sviluppare i meccanismi necessari per limitare o ridurre le emissioni, come ad esempio l'adozione della strategia IMO del 2023[34] sulla riduzione delle emissioni di gas serra, che punta al raggiungimento di emissioni nette pari a zero entro o intorno al 2050.

Il successo della strategia Net-zero è legato alla disponibilità e alla diffusione di tecnologie e combustibili a zero o quasi zero emissioni. A tal fine la strategia include un obiettivo specifico per l'adozione di queste fonti energetiche, secondo la quale entro il 2030 i combustibili o le fonti di energia *green* dovranno rappresentare almeno il 5% dell'energia totale utilizzata dal settore[34].

Lo strumento giuridico principale attraverso cui il MEPC implementa le normative ambientali è la convenzione internazionale per la prevenzione dell'inquinamento causato da navi (MARPOL), in particolare le norme relative alle emissioni atmosferiche e all'efficienza energetica sono integrate nell'Annex VI[17].

Le misure globali comprese nell'Annex per il miglioramento dell'efficienza energetica delle navi comprendono:

- EEDI (Energy Efficiency Design Index): misura tecnica obbligatoria per le nuove navi che impone standard minimi di efficienza energetica fin dalla fase di progettazione, adottato nel 2011;
- EEXI (Energy Efficiency Existing Ship Index) e CII (Carbon Intensity Indicator): indici che estendono i requisiti di efficienza anche alle navi esistenti e monitorano le emissioni di carbonio annuali, classificando le navi con una valutazione da A a E, adottati nel 2021;

[80] *Lloyd's Register, MEPC 84 Summary Report, 2026.*
[81] *European Parliament, Key issues at MEPC 84, 2026.*

- SEEMP (Ship Energy Efficiency Management Plan): un meccanismo gestionale obbligatorio che richiede alle compagnie di stabilire piani per migliorare l'efficienza operativa della flotta.

L'Annex VI comprende l'integrazione di misure di medio termine per supportare la strategia 2023. Il relativo *framework* net-zero prevede uno standard tecnico, per la graduale riduzione di intensità di gas serra, e un elemento economico, meccanismo di prezzo delle emissioni finalizzato a incentivare la transizione verso tecnologie e carburanti a zero o quasi zero emissioni.

L'adozione, nel 2023, della strategia di riduzione delle emissioni di GHG[34] è stata particolarmente caratterizzante per la politica ambientale marittima, alzando le aspettative rispetto alla strategia precedentemente in atto e portando gli obiettivi per il settore in linea con quelli dell'Accordo di Parigi.

La strategia, oltre a porre degli obiettivi, stabilisce dei checkpoints indicativi utili per il monitoraggio dei progressi e per dare dei riscontri agli attori del settore.

Le principali tappe per la riduzione delle emissioni totali annue di GHG derivanti dal trasporto marittimo internazionale prevedono una diminuzione di almeno il 20% entro il 2030 e di almeno il 70% entro il 2040, in entrambi i casi rispetto ai livelli registrati nel 2008. Tali obiettivi sono richiamati anche nelle strategie dell'organizzazione per la decarbonizzazione (cfr. Figura 2.9).

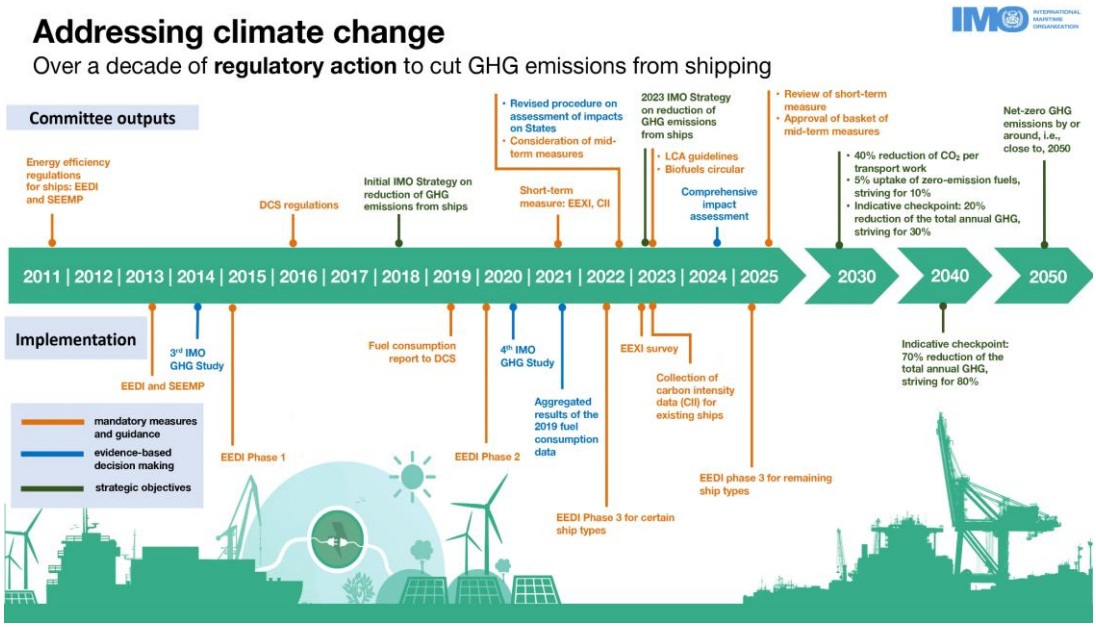


Figura 2.9: Cronostoria delle azioni regolatorie dell'IMO per la riduzione delle emissioni di gas serra. Fonte: IMO (2024), Addressing Climate Change: Over a decade of regulatory action to cut GHG emissions from shipping

2.3 Il quadro normativo europeo per i carburanti sostenibili nei settori aereo e marittimo

2.3.1 Settore aeronautico

La decarbonizzazione del trasporto aereo rappresenta una delle sfide più complesse della politica climatica dell'Unione europea. L'aviazione, come più volte sottolineato, presenta infatti caratteristiche tecnologiche, operative e infrastrutturali che rendono la transizione energetica complessa. L'elevato fabbisogno energetico dei voli, la lunga vita utile degli aeromobili, la dimensione internazionale del mercato e la rilevanza del costo del carburante nella struttura economica delle compagnie aeree impongono un intervento regolatorio graduale nel tempo.

I sistemi normativi dell'UE per la regolamentazione di questo settore sono:

- la RED II/RED III;
- il ReFuelEU Aviation;
- l'EU ETS.

In particolare, la RED II, come modificata dalla RED III, definisce l'architettura della transizione energetica, stabilendo obiettivi in materia di energie rinnovabili, criteri di sostenibilità, metodologie di calcolo delle emissioni e sistemi di certificazione dei combustibili. ReFuelEU Aviation, invece, impone quote obbligatorie di SAF crescenti nel tempo, prevenendo la concorrenza sleale e puntando a creare una domanda stabile di carburanti sostenibili. L'EU ETS, infine, attribuisce un prezzo alle emissioni e incentiva gli operatori a ridurre il proprio impatto climatico.

Tale struttura normativa si inserisce nel contesto del Green Deal europeo[82], del pacchetto Fit for 55[83] e della Normativa europea sul clima[84], che vincola l'Unione al conseguimento della neutralità climatica entro il 2050 e alla riduzione delle emissioni nette di gas a effetto serra di almeno il 55% entro il 2030 rispetto ai livelli del 1990.

RED II/RED III nel settore aeronautico

La Direttiva (UE) 2023/2413[24], comunemente nota come RED III, rappresenta la revisione più recente della disciplina europea sulla promozione dell'energia da fonti rinnovabili.

---

[82] *Commissione europea, Il Green Deal europeo, COM(2019) 640 final, 11 dicembre 2019.*

[83] *Commissione europea, "Fit for 55": realizzare l'obiettivo climatico dell'UE per il 2030 lungo il cammino verso la neutralità climatica, COM(2021) 550 final, 14 luglio 2021.*

[84] *Regolamento (UE) 2021/1119, c.d. Normativa europea sul clima, artt. 2 e 4.*

Questa modifica la Direttiva (UE) 2018/2001[85], cioè la RED II, rafforzando l'ambizione dell'Unione in materia di transizione energetica. Per questa ragione, quando si fa riferimento al quadro complessivo in materia di transizione energetica, è più corretto parlare di RED II/RED III. Quando invece si richiamano le novità introdotte dalla riforma del 2023, può essere utilizzata la sola espressione RED III.

La RED III alza l'obiettivo europeo relativo alla quota di energia da fonti rinnovabili nel consumo finale lordo al 42,5% entro il 2030, prevedendo inoltre che gli Stati membri si adoperino per raggiungere il 45%. Tale rafforzamento riflette anche la necessità di ridurre la dipendenza dell'Unione europea dai combustibili fossili importati, esigenza emersa con particolare evidenza a seguito della crisi energetica e geopolitica successiva all'invasione russa dell'Ucraina e formalizzata nel piano REPowerEU[86].

Nel settore dei trasporti, la RED III prevede che gli Stati membri impongano obblighi ai fornitori di combustibili affinché entro il 2030 venga conseguito alternativamente uno dei due obiettivi: una quota di energia rinnovabile nel consumo finale del settore dei trasporti pari almeno al 29%, oppure una riduzione dell'intensità delle emissioni di gas a effetto serra pari almeno al 14,5%. Inoltre, la direttiva prevede un sotto-obiettivo per i combustibili più avanzati: biocarburanti avanzati, biogas prodotti da materie prime dell'allegato IX, parte A, e combustibili rinnovabili di origine non biologica devono raggiungere complessivamente almeno il 5,5% nel 2030, di cui almeno l'1% costituito da combustibili rinnovabili di origine non biologica.

Un elemento centrale della disciplina RED è rappresentato dai criteri di sostenibilità e di riduzione delle emissioni di gas a effetto serra. I combustibili possono infatti essere contabilizzati ai fini degli obiettivi europei e nazionali solo se rispettano i requisiti previsti dalla normativa, dimostrando un effettivo risparmio emissivo rispetto ai combustibili fossili di riferimento e l'assenza di impatti ambientali incompatibili con gli obiettivi dell'Unione. La sostenibilità non è quindi definita soltanto in base all'origine rinnovabile del combustibile, ma richiede una valutazione più ampia, fondata sul ciclo di vita, sulle materie prime impiegate e sugli effetti ambientali diretti e indiretti.

In tale quadro, assume particolare rilievo il cambiamento indiretto della destinazione d'uso dei terreni, noto come ILUC. Alcune filiere, soprattutto quelle fondate su colture alimentari o foraggere, possono infatti determinare pressioni sui terreni agricoli, conversione di aree ad alto stock di carbonio, deforestazione indiretta o perdita di biodiversità. Per tale ragione, la disciplina europea collega la promozione delle energie rinnovabili alla tutela degli ecosistemi, degli habitat e delle risorse naturali.

La sostenibilità è inoltre garantita anche attraverso meccanismi di certificazione e verifica. Gli operatori economici devono fornire informazioni attendibili sulla conformità dei

---

[85] Direttiva (UE) 2018/2001, c.d. RED II.

[86] Commissione europea, Piano REPowerEU, COM(2022) 230 final, 18 maggio 2022.

combustibili ai criteri europei, mettendo a disposizione i dati necessari a dimostrare il risparmio emissivo e la sostenibilità delle materie prime. Gli Stati membri devono assicurare controlli indipendenti adeguati, volti a verificare che i sistemi utilizzati siano precisi, affidabili e resistenti alle frodi.

Infine, come analizzato nel paragrafo 1.4.1, affinché un combustibile possa contribuire agli obblighi di decarbonizzazione del settore aereo, deve soddisfare due livelli distinti di requisiti. In primo luogo, deve essere tecnicamente idoneo all'impiego aeronautico, garantendo il rispetto degli standard di sicurezza, qualità e compatibilità con motori e infrastrutture esistenti. In secondo luogo, deve essere certificato come sostenibile secondo la normativa europea, dimostrando il rispetto dei criteri previsti in termini di riduzione delle emissioni e sostenibilità ambientale.

ReFuelEU Aviation

Il Regolamento (UE) 2023/2405[23], noto come ReFuelEU Aviation, costituisce la disciplina specifica attraverso cui l'Unione europea promuove la diffusione dei carburanti sostenibili per l'aviazione. Il regolamento mira a ridurre progressivamente la dipendenza dell'aviazione dai combustibili fossili, garantendo al tempo stesso condizioni omogenee nel mercato interno. Tale esigenza risulta particolarmente rilevante in un settore fortemente integrato ed esposto alla concorrenza internazionale, nel quale i carburanti sostenibili presentano ancora costi di produzione significativamente superiori rispetto a quelli convenzionali. In assenza di regole comuni, differenze normative o di prezzo tra aeroporti potrebbero favorire comportamenti opportunistici da parte degli operatori, riducendo l'efficacia ambientale delle misure.

ReFuelEU Aviation è dunque una *lex specialis* del settore aereo, destinata a integrare la disciplina generale sulle energie rinnovabili della Direttiva (UE) 2018/2001 con obblighi specifici per l'aviazione.

Il regolamento individua nei SAF la soluzione più immediatamente praticabile per la decarbonizzazione del settore aereo nel breve e medio periodo. In particolare, i SAF presentano il vantaggio di poter essere utilizzati, in larga parte, come carburanti *drop-in*, cioè compatibili con le infrastrutture e i motori aeronautici esistenti.

ReFuelEU Aviation adotta una definizione giuridica precisa di carburanti sostenibili per l'aviazione, distinguendo tre categorie principali:

- biocarburanti per l'aviazione;
- carburanti sintetici per l'aviazione;
- carburanti per l'aviazione derivanti da carbonio riciclato.

I biocarburanti per l'aviazione includono i biocarburanti avanzati, quelli prodotti da materie prime elencate nell'allegato IX, parte B, della Direttiva (UE) 2018/2001, e altri

biocarburanti conformi alla disciplina europea, purché rispettino i criteri di sostenibilità e di riduzione delle emissioni durante il ciclo di vita e siano certificati secondo le regole previste dalla direttiva. Tuttavia, il regolamento introduce limiti rilevanti. I biocarburanti diversi da quelli avanzati e da quelli ottenuti dalle materie prime dell'allegato IX, parte B, possono contribuire al rispetto delle quote minime solo entro una soglia massima del 3%. Sono inoltre esclusi dal calcolo delle quote minime i carburanti prodotti da colture alimentari e foraggere, colture intermedie, materiali derivati da palma e soia e altre materie prime considerate problematiche, salvo specifiche eccezioni previste dal diritto dell'Unione.

I carburanti sintetici per l'aviazione costituiscono una categoria strategica. Essi rientrano tra i combustibili rinnovabili di origine non biologica, spesso associati agli *e-fuels* o ai carburanti *Power-to-Liquid*, prodotti attraverso energia elettrica rinnovabile e carbonio catturato. Il loro potenziale di riduzione delle emissioni è elevato, ma i costi di produzione risultano ancora significativamente superiori a quelli del carburante convenzionale.

Infine, i carburanti per l'aviazione derivanti da carbonio riciclato valorizzano invece flussi di carbonio residuali che, in assenza di recupero, sarebbero dispersi o inutilizzati. Anche in questo caso, l'ammissibilità non è automatica: tali carburanti devono rispettare le soglie di riduzione delle emissioni durante il ciclo di vita e devono essere certificati conformemente alla disciplina europea.

Il cuore operativo di ReFuelEU Aviation è rappresentato dall'obbligo imposto ai fornitori di carburante per l'aviazione di garantire che tutto il carburante messo a disposizione degli operatori aerei negli aeroporti dell'Unione contenga quote minime crescenti di SAF. La traiettoria stabilita dall'Allegato I del regolamento prevede un incremento progressivo delle quote minime di carburanti sostenibili per l'aviazione, includendo anche specifici sotto-obblighi relativi ai carburanti sintetici. In particolare, sono previste le seguenti soglie:

- dal 1° gennaio 2025, una quota minima annua del 2% di carburanti sostenibili per l'aviazione;
- dal 1° gennaio 2030, una quota minima annua del 6% di carburanti sostenibili per l'aviazione, con una quota media dell'1,2% di carburanti sintetici nel periodo 2030-2031, di cui almeno lo 0,7% ogni anno;
- dal 1° gennaio 2032 al 31 dicembre 2034, nell'ambito della quota minima del 6% di carburanti sostenibili per l'aviazione, una quota media del 2,0% di carburanti sintetici, con una quota minima annua dell'1,2% nel biennio 2032-2033 e del 2,0% nel 2034;
- dal 1° gennaio 2035, una quota minima annua del 20% di carburanti sostenibili per l'aviazione, di cui almeno il 5% costituito da carburanti sintetici;
- dal 1° gennaio 2040, una quota minima annua del 34% di carburanti sostenibili per l'aviazione, di cui almeno il 10% costituito da carburanti sintetici;
- dal 1° gennaio 2045, una quota minima annua del 42% di carburanti sostenibili per l'aviazione, di cui almeno il 15% costituito da carburanti sintetici;
- dal 1° gennaio 2050, una quota minima annua del 70% di carburanti sostenibili per l'aviazione, di cui almeno il 35% costituito da carburanti sintetici.

Questa progressione svolge una funzione industriale e regolatoria. Da un lato, crea una domanda normativa stabile, necessaria per orientare gli investimenti nella produzione di SAF. Dall'altro, consente una transizione graduale, tenendo conto della disponibilità ancora limitata delle materie prime, delle capacità produttive e dei costi industriali.

Un secondo elemento essenziale, come già accennato nel paragrafo 2.1.1, è il contrasto al *fuel tankering*, cioè la pratica mediante la quale un aeromobile carica più carburante del necessario in un aeroporto dove il carburante costa meno, per evitare di rifornirsi altrove. Tale pratica aumenta il peso dell'aereo, il consumo di carburante e quindi le emissioni. L'articolo 5 stabilisce perciò che il quantitativo annuo di carburante caricato da un operatore aereo in un determinato aeroporto dell'Unione debba corrispondere ad almeno il 90% del fabbisogno annuo di carburante per l'aviazione. Sono previste deroghe per ragioni di sicurezza e, in via eccezionale, esenzioni temporanee debitamente giustificate per specifiche rotte[87] [88].

Il sistema è completato da obblighi di monitoraggio, comunicazione e tracciabilità. Gli operatori aerei devono comunicare informazioni relative al carburante caricato, al fabbisogno annuo, agli acquisti di SAF e alle caratteristiche dei carburanti acquistati. I fornitori devono a loro volta inserire nella banca dati dell'Unione informazioni sulle quantità fornite, sulle materie prime, sui processi di conversione e sulle emissioni durante il ciclo di vita. Tali relazioni devono essere verificate indipendentemente, secondo criteri collegati anche alla disciplina dell'EU ETS.

Il sistema di tracciabilità risponde anche all'esigenza di evitare la doppia contabilizzazione dei benefici ambientali associati all'uso dei SAF. Il regolamento stabilisce infatti che gli operatori aerei non possano ottenere benefici per la stessa partita di carburante sostenibile nell'ambito di più sistemi relativi alle emissioni di gas a effetto serra. In questo modo, ReFuelEU Aviation assicura che i vantaggi derivanti dall'impiego dei SAF siano attribuiti una sola volta e in modo verificabile.

L'effettività del regolamento è rafforzata da un sistema di sanzioni pecuniarie. Gli Stati membri devono assicurare che le violazioni degli obblighi comportino sanzioni proporzionate. Per gli operatori aerei che non rispettano l'obbligo di rifornimento, la sanzione non può essere inferiore al doppio del prodotto tra il prezzo medio annuo del carburante per l'aviazione e il quantitativo annuo totale non caricato. Per i fornitori che non rispettano le quote minime di SAF, la sanzione è calcolata sulla differenza tra il prezzo medio del carburante convenzionale e quello sostenibile, moltiplicata per il quantitativo mancante.

Un aspetto rilevante è che la sanzione economica non sostituisce l'obbligo di per sé: qualora un fornitore non rispetti le quote minime, deve comunque fornire nel periodo successivo la

---

[87] *EUROCONTROL, Fuel Tankering: Economic Benefits vs Environmental Cost, 2024.*

[88] *Soone, J., ReFuelEU Aviation initiative: Summary of Parliament's and Council's positions (Briefing PE 739.347). European Parliamentary Research Service (EPRS), 2023.*

quantità mancante, in aggiunta a quella già dovuta per il nuovo periodo. In questo modo il regolamento non si limita solo a sanzionare l'eventuale inadempimento, ma garantisce che l'obiettivo di diffusione dei carburanti sostenibili venga comunque raggiunto nel tempo.

EU ETS nel settore aeronautico

Accanto alla RED III e a ReFuelEU Aviation, uno strumento essenziale nella politica climatica europea è l'EU ETS. Istituito dalla Direttiva 2003/87/CE[89], esso attribuisce un valore economico alle emissioni di gas a effetto serra, imponendo agli operatori soggetti al sistema di restituire quote corrispondenti alle emissioni prodotte.

Per il settore dell'aviazione, la Direttiva (UE) 2023/958[90] ha modificato la Direttiva 2003/87/CE, rafforzando il contributo del trasporto aereo agli obiettivi europei di riduzione delle emissioni e coordinando il sistema europeo con l'attuazione della misura globale di mercato per l'aviazione internazionale, rappresentata dal CORSIA.

Un elemento centrale della riforma è il progressivo superamento delle quote di emissioni gratuite assegnate agli operatori aerei, con una riduzione del 25% nel 2024 e 50% nel 2025 e la piena messa all'asta delle quote a partire dal 2026.

Rispetto a ReFuelEU Aviation, l'EU ETS svolge una funzione distinta: mentre il primo mira a modificare progressivamente il mix di carburanti utilizzato dagli aeromobili, il secondo incide sul costo delle emissioni prodotte. Il coordinamento tra i due strumenti risulta quindi necessario anche per garantire coerenza nella contabilizzazione dei benefici emissivi derivanti dall'uso dei SAF, secondo quanto previsto dal regolamento ReFuelEU Aviation. Inoltre, il fattore di emissione applicabile ai SAF nell'ambito dell'EU ETS è determinato secondo la Direttiva 2003/87/CE.

2.3.2 Settore marittimo

La decarbonizzazione del trasporto marittimo rappresenta un ulteriore asse centrale della politica climatica dell'Unione europea. Analogamente al settore aereo, anche quello marittimo rientra tra i comparti più difficili da decarbonizzare, a causa dell'elevata intensità energetica delle operazioni, della dimensione internazionale delle rotte, della lunga vita utile delle navi e della forte esposizione alla concorrenza globale.

---

[89] *Direttiva (UE) 2003/87/CE, c.d. Direttiva EU ETS.*

[90] *Direttiva (UE) 2023/958, recante modifica della Direttiva 2003/87/CE con riferimento al settore dell'aviazione e al coordinamento con la misura mondiale basata sul mercato.*

Il principale riferimento normativo specificamente dedicato all'energia utilizzata a bordo delle navi è FuelEU Maritime, che impone la progressiva riduzione dell'intensità emissiva dei combustibili e dei vettori energetici impiegati nel trasporto marittimo.

Accanto a FuelEU Maritime sono presenti anche due strumenti trasversali già analizzati nel sottoparagrafo relativo al settore aeronautico: l'EU ETS e la RED II/RED III. Per evitare duplicazioni, essi non verranno nuovamente esaminati in modo esteso, ma saranno richiamati solo nella misura necessaria a comprendere le loro specificità relative al contesto marittimo.

In particolare, l'EU ETS conserva rilievo anche per il settore marittimo perché, pur non essendo una normativa esclusiva dello shipping, è stato esteso al trasporto marittimo per attribuire un costo economico alle emissioni prodotte dalle navi. La RED II/RED III, invece, resta rilevante perché definisce i criteri generali di sostenibilità, certificazione e riduzione delle emissioni lungo il ciclo di vita.

RED II/RED III nel settore marittimo

Nel contesto marittimo, la funzione principale della RED II/RED III è quella di operare come parametro di qualificazione e certificazione dei combustibili che possono essere valorizzati ai fini di FuelEU Maritime. Perché tali combustibili possano essere valorizzati nel quadro europeo, essi devono rispettare i criteri di sostenibilità, tracciabilità e riduzione delle emissioni previsti dalla disciplina europea sulle energie rinnovabili.

Ciò assume particolare rilievo per i combustibili rinnovabili di origine non biologica e per i combustibili derivanti da carbonio riciclato. Tali combustibili possono contribuire alla riduzione dell'intensità emissiva del trasporto marittimo solo se il loro beneficio climatico è effettivo e verificabile lungo l'intero ciclo di vita. La disciplina europea richiede pertanto che la riduzione delle emissioni non sia oggetto di doppio conteggio e che la sostenibilità del combustibile sia dimostrata mediante sistemi di certificazione affidabili.

FuelEU Maritime

Il principale riferimento normativo europeo in materia di combustibili sostenibili per uso marittimo è il Regolamento (UE) 2023/1805[33], noto come FuelEU Maritime. Tale regolamento si inserisce nel pacchetto Fit for 55 e mira a stimolare la domanda di combustibili rinnovabili e a basse emissioni di carbonio nel settore marittimo, contribuendo alla riduzione delle emissioni prodotte dalle navi.

A differenza di ReFuelEU Aviation, che impone quote minime progressive di carburanti sostenibili per l'aviazione, FuelEU Maritime adotta un'impostazione fondata sulla riduzione dell'intensità di gas a effetto serra dell'energia utilizzata a bordo, perseguendo una logica prestazionale e tecnologicamente neutra. Il regolamento non impone l'uso di un singolo

combustibile, ma lascia agli operatori la possibilità di ricorrere a diverse soluzioni, purché sia rispettato il limite emissivo previsto.

L'indice di intensità GHG viene calcolato rapportando le emissioni complessive di CO_2, CH_4 e N_2O all'energia utilizzata dalla nave nell'anno di riferimento, con un percorso di progressiva decarbonizzazione che parte dal 2025 e si estende fino al 2050. La traiettoria di riduzione è progressiva: l'intensità dei gas a effetto serra dell'energia utilizzata a bordo dovrà essere ridotta del 2% dal 2025, del 6% dal 2030, del 14,5% dal 2035, del 31% dal 2040, del 62% dal 2045 e dell'80% dal 2050. I requisiti si applicano all'energia utilizzata durante la permanenza in un porto dell'Unione, all'energia utilizzata nei viaggi tra due porti dell'UE e, in misura parziale, all'energia utilizzata nei viaggi tra un porto dell'Unione e un porto di un paese terzo.

In caso di non conformità, la compagnia è soggetta a una sanzione pecuniaria, secondo quanto previsto dall'articolo 23 del Regolamento (UE) 2023/1805. Al tempo stesso, il regolamento introduce meccanismi di flessibilità, quali *banking, borrowing e pooling* dei saldi di conformità, disciplinati dagli articoli 20 e 21, che consentono una gestione più elastica degli obblighi senza compromettere l'obiettivo ambientale complessivo del sistema FuelEU Maritime. In particolare:

- il banking permette di trasferire a un periodo successivo l'eccedenza di conformità maturata da una nave;
- il borrowing consente, in presenza di un deficit, di anticipare una quota di conformità dal periodo successivo, con una maggiorazione del 10%;
- il pooling consente di aggregare i saldi di conformità di più navi, così che l'eccedenza generata da una nave possa compensare il deficit di un'altra.

FuelEU Maritime attribuisce particolare rilievo ai combustibili rinnovabili di origine non biologica[33], ossia gli RFNBO, in quanto essi rappresentano una delle soluzioni più promettenti per la decarbonizzazione del trasporto marittimo. Per incentivarne l'impiego, il regolamento prevede un trattamento favorevole nel calcolo dell'intensità emissiva dell'energia utilizzata a bordo, attraverso un fattore premiale applicabile all'energia derivante da tali combustibili. Tale meccanismo non modifica il consumo energetico reale della nave, ma favorisce la diffusione degli RFNBO in una fase in cui tali combustibili presentano ancora costi elevati e disponibilità limitata.

La possibilità di beneficiare di tale trattamento è tuttavia subordinata alla qualificazione del combustibile come RFNBO secondo il quadro europeo sulle energie rinnovabili, sancito dalla RED II/RED III.

Un ulteriore profilo rilevante riguarda l'alimentazione elettrica da terra, o *on-shore power supply*. A partire dal 1º gennaio 2030, alcune navi ormeggiate nei porti di scalo dell'Unione dovranno collegarsi all'alimentazione elettrica da terra e utilizzarla per soddisfare il proprio fabbisogno di energia elettrica durante la sosta, salvo specifiche deroghe. Questa previsione

collega la disciplina dei combustibili alla trasformazione infrastrutturale dei porti, riducendo le emissioni prodotte dalle navi in banchina e favorendo l'elettrificazione delle operazioni portuali.

EU ETS nel settore marittimo

La specificità del settore marittimo deriva dalla Direttiva (UE) 2023/959[91], che ha modificato la disciplina originaria includendo progressivamente le attività di shipping nell'EU ETS.

Tale inserimento si fonda sul percorso già avviato con il Regolamento (UE) 2015/757[92], che aveva introdotto un sistema di monitoraggio, comunicazione e verifica delle emissioni del trasporto marittimo, poi utilizzato come base conoscitiva per l'applicazione dell'ETS allo shipping.

L'ambito applicativo dell'EU ETS nel settore marittimo è definito secondo un criterio prevalentemente territoriale. La disciplina riguarda le navi di stazza lorda pari o superiore a 5.000 tonnellate che effettuano viaggi commerciali verso, da o tra porti dello Spazio economico europeo, indipendentemente dalla bandiera battuta. Sono incluse integralmente le emissioni prodotte nei viaggi intra-UE e durante la permanenza nei porti europei, mentre per i viaggi tra un porto dell'Unione e un porto di un paese terzo rileva il 50% delle emissioni. Tale impostazione mira a garantire l'efficacia ambientale della misura, evitando al contempo una regolazione eccessivamente extraterritoriale delle tratte internazionali.

In questo quadro, l'EU ETS svolge per il settore marittimo una funzione di incentivo economico indiretto alla decarbonizzazione, rendendo economicamente rilevante la quantità di emissioni prodotte dalle navi. Di conseguenza, gli operatori sono incentivati a ridurre il fabbisogno di quote attraverso soluzioni quali l'efficienza energetica, l'ottimizzazione operativa, il retrofit tecnologico e l'adozione di combustibili rinnovabili o a minore intensità carbonica.

---

[91] Direttiva (UE) 2023/959, recante riforma dell'EU ETS e inclusione progressiva del trasporto marittimo nel sistema.

[92] Regolamento (UE) 2015/757, c.d. MRV Shipping Regulation.

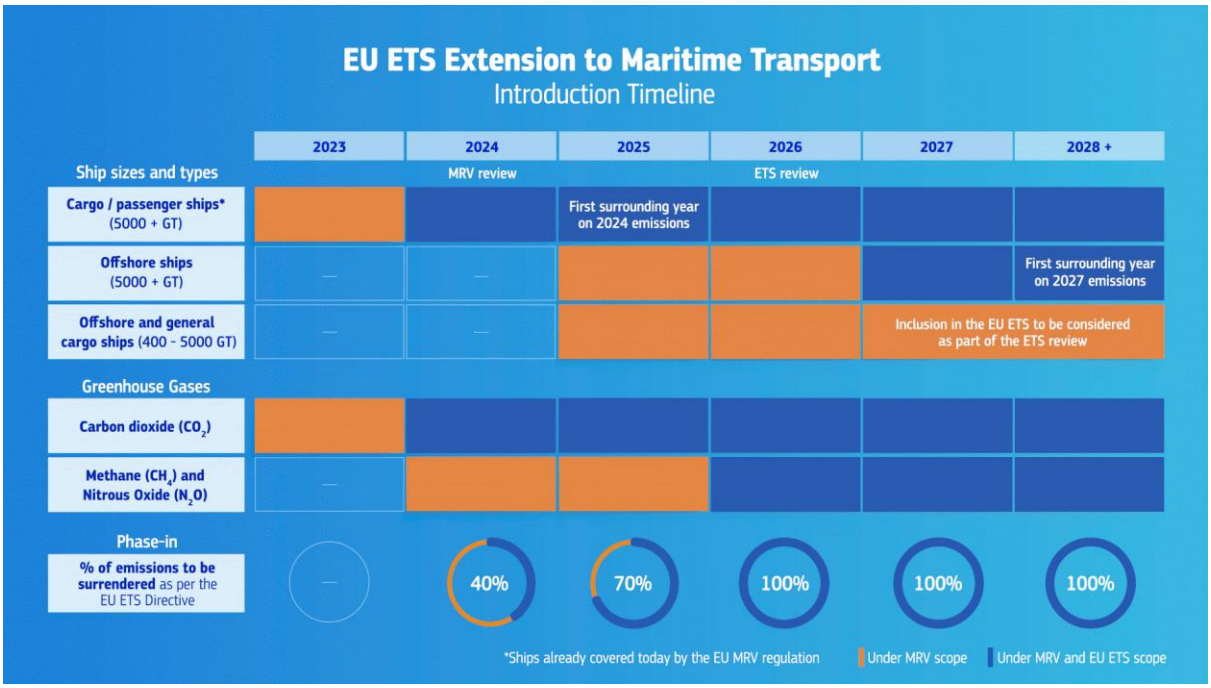


Figura 2.10: Cronoprogramma (Phase-in) per l'estensione del sistema EU ETS al trasporto marittimo.
Fonte: Commissione Europea

2.4 Criticità e limiti del quadro regolatorio internazionale ed europeo

L'architettura normativa ricostruita nei paragrafi precedenti evidenzia come il problema attuale non sia più l'assenza di regolazione, ma la difficoltà di garantire coerenza ed efficace implementazione delle normative esistenti. La governance dei carburanti sostenibili coinvolge infatti fonti internazionali, europee e nazionali, nonché strumenti diversi per finalità e ambito di applicazione.

2.4.1 Settore aeronautico

Nel settore aeronautico, una prima criticità riguarda il coordinamento tra la disciplina europea e il quadro internazionale elaborato in sede ICAO. Da un lato, l'Unione europea tende ad anticipare e rafforzare la regolazione climatica, imponendo obblighi specifici agli operatori e ai fornitori di carburante. Questo approccio deve però confrontarsi con l'incertezza legata alla convergenza delle politiche a livello internazionale, necessaria per garantire l'efficacia delle misure climatiche e la stabilità del sistema nel lungo periodo. Il rischio è che obblighi più stringenti nell'Unione possano incidere sui costi degli operatori europei senza trovare un equivalente nei mercati extra-UE.

Una seconda criticità riguarda l'eterogeneità nella definizione dei carburanti sostenibili. Nel diritto dell'Unione, la nozione di SAF è costruita sull'interazione tra le direttive RED II/RED III e il regolamento ReFuelEU Aviation (si veda paragrafo 1.4.1) e comprende

biocarburanti per l'aviazione, carburanti sintetici e carburanti derivanti da carbonio riciclato.

Nel quadro ICAO-CORSIA, invece, la classificazione segue categorie e metodologie proprie, come già anticipato nel paragrafo 2.2.1. In particolare, vengono individuati i CORSIA Eligible Fuels[78] (CEF) come insieme di:

- CORSIA Sustainable Aviation Fuels (SAF): un combustibile alternativo prodotto da fonti rinnovabili o rifiuti, che rispetta i criteri di sostenibilità di CORSIA;
- CORSIA Lower Carbon Aviation Fuel (LCAF): un combustibile alternativo prodotto da fonti fossili, che rispetta i criteri di sostenibilità di CORSIA.

Ciò comporta che un carburante possa essere valutato secondo criteri non perfettamente coincidenti nei diversi sistemi regolatori, rendendo la comprensione dei criteri di sostenibilità più difficile per gli attori coinvolti.

Un ulteriore profilo problematico riguarda la disponibilità e il costo dei SAF. ReFuelEU Aviation mira a creare una domanda stabile di carburanti sostenibili, ma tale domanda deve confrontarsi con una produzione ancora limitata e con costi superiori rispetto al carburante convenzionale. La regolazione può orientare gli investimenti e ridurre l'incertezza del mercato, ma non può da sola garantire che l'offerta di SAF cresca con la stessa rapidità degli obblighi imposti.

Infine, nel settore aeronautico assume rilievo il rischio di doppia contabilizzazione dei benefici ambientali, già richiamato nei paragrafi precedenti. Una stessa riduzione emissiva deve infatti essere conteggiata una sola volta, per evitare una sovrastima del contributo dei carburanti sostenibili.

2.4.2 Settore marittimo

Anche nel settore marittimo, il quadro regolatorio europeo è avanzato, ma deve confrontarsi con la dimensione globale dello shipping. Sebbene strumenti come l'estensione dell'EU ETS al trasporto marittimo e il Regolamento FuelEU Maritime rafforzino l'azione climatica dell'Unione, una regolazione limitata al solo livello europeo rischia di risultare insufficiente in assenza di un coordinamento efficace con la disciplina internazionale definita in sede IMO.

Questa esigenza di coordinamento è particolarmente rilevante perché gli obblighi europei possono incidere sui costi operativi delle navi che scalano porti dell'Unione. In assenza di regole omogenee a livello globale, alcuni operatori potrebbero essere incentivati a modificare le proprie scelte logistiche, privilegiando porti situati fuori dall'Unione europea per ridurre l'esposizione agli obblighi dell'EU ETS. Il rischio è particolarmente

significativo per i porti di transhipment, dove anche differenze di costo limitate possono influenzare le decisioni delle compagnie.

In tale prospettiva, il problema non riguarda soltanto la competitività dei porti europei, ma anche l'efficacia ambientale della regolazione. Lo spostamento dei traffici verso porti extra-UE potrebbe infatti non determinare una reale riduzione delle emissioni complessive, ma semplicemente trasferirle al di fuori del perimetro regolatorio europeo.

Un ulteriore problema concerne la pluralità del quadro normativo applicabile al settore marittimo, composto da FuelEU Maritime, EU ETS e RED II/RED III. Pur convergendo verso il comune obiettivo della decarbonizzazione, tali strumenti operano secondo logiche differenti e possono generare incertezze nell'interpretazione degli obblighi, degli incentivi e dei criteri di contabilizzazione.

Un rischio rilevante è che gli obblighi regolatori procedano più rapidamente della capacità industriale e infrastrutturale necessaria a sostenerli. Sebbene FuelEU Maritime incentivi l'utilizzo di combustibili rinnovabili e a basse emissioni, la transizione dipende dalla maturità tecnologica, dalla disponibilità commerciale, dal costo dei nuovi carburanti, oltre che dalla presenza di infrastrutture di bunkeraggio adeguate.

Infine, un ulteriore limite riguarda la mancanza di una categoria unitaria equivalente ai SAF del settore aeronautico. Nel trasporto marittimo, non esiste una nozione unica e omogenea di "carburante sostenibile" paragonabile a quella utilizzata per l'aviazione (si veda paragrafo 1.4.2). Ciò consente una maggiore flessibilità tecnologica nella scelta delle soluzioni di decarbonizzazione, ma può generare maggiore incertezza interpretativa circa le tipologie di combustibili qualificabili come sostenibili e concretamente implementabili dagli operatori.

2.5 Domanda, offerta e struttura di mercato dei carburanti sostenibili

In questa sezione verrà approfondita la struttura di mercato dei carburanti sostenibili, sia per quanto riguarda il settore aeronautico che per il settore marittimo, comprensiva di analisi di domanda, offerta e barriere alla scalabilità. L'obiettivo non è anticipare l'analisi puntuale del pricing, che sarà sviluppata nel Capitolo 3, ma chiarire perché il mercato dei carburanti sostenibili non sia ancora in grado di espandersi in modo autonomo. In questa prospettiva, il prezzo viene considerato come una barriera alla domanda e agli investimenti, mentre l'evoluzione dei differenziali di prezzo, le dinamiche temporali e il confronto quantitativo tra carburanti alternativi e fossili saranno approfonditi successivamente.

2.5.1 Settore aeronautico

Secondo le informazioni raccolte con il supporto della rete degli Stati membri istituita a supporto dell'attuazione di ReFuelEU Aviation, l'attuale capacità produttiva annua di SAF nell'UE è di poco superiore a 1 milione di tonnellate (Mt). La quasi totalità di tale produzione è costituita da HEFA e non tiene conto della produzione derivante dalla co-lavorazione di materie prime sostenibili in impianti a combustibili fossili, per la quale non sono disponibili informazioni sufficientemente affidabili. Nello specifico, la quota di "aviation biofuels" rispetto alla fornitura totale di SAF per gli aeroporti dell'UE nel 2024 è ammontata a circa il 98%, di cui l'81% è derivato dall'utilizzo di olio da cucina esausto come materia prima. L'utilizzo di questi carburanti alternativi al classico *Jet fuel* ha permesso di registrare un risparmio di emissioni di gas serra (GHG) pari a 714 kt CO_2eq, che equivale ad una riduzione del 91% rispetto al carburante per aerei tradizionale che è stato sostituito[93].

Domanda di SAF

In merito alla domanda di SAF all'interno dell'Unione Europea, si può affermare che quest'ultima sia principalmente sostenuta e trainata dagli obiettivi imposti dalla normativa comunitaria. In particolare, come descritto nel paragrafo 2.3.1, il punto di riferimento è il regolamento 2023/2405 "ReFuelEU Aviation", il quale prevede quote minime crescenti di carburante sostenibile per l'aviazione in ogni aeroporto dell'Unione Europea.

All'interno del *ReFuelEU Aviation Annual Technical Report*, l'EASA ha analizzato la domanda di SAF da parte degli aeroporti europei nel 2024. In particolare, lo studio si è basato sui dati forniti da 262 operatori aerei, i quali hanno rappresentato il 74% di tutti gli operatori aerei soggetti agli obblighi di segnalazione. Il restante 26% dei rapporti o non è stato presentato o non è stato accettato dalle autorità nazionali competenti[93].

I dati raccolti evidenziano una differenza tra i quantitativi dichiarati dai diversi soggetti coinvolti nella filiera. Da un lato, gli operatori aerei hanno dichiarato l'acquisto di circa 357,6 kt di SAF nel corso del 2024; dall'altro, i fornitori di carburante hanno comunicato la fornitura di circa 192,7 kt di SAF negli aeroporti dell'Unione Europea. Quest'ultimo valore corrisponde a circa lo 0,6% del carburante totale fornito negli aeroporti UE[93], evidenziando una distanza significativa rispetto all'obiettivo minimo del 2% previsto da ReFuelEU Aviation per il 2025 (cfr. Figura 2.11).

[93] *EASA, ReFuelEU Aviation Annual Technical Report 2025.*

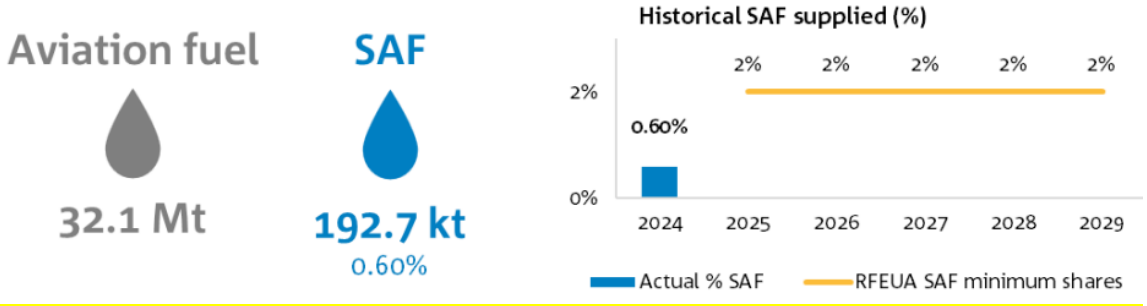


Figura 2.11: Quota SAF erogata negli aeroporti UE nel 2024 e proiezioni al 2030.
Fonte: EASA, ReFuelEU Aviation Annual Technical Report 2025

La differenza tra i due valori non rappresenta un'incoerenza dei dati: l'EASA sottolinea infatti che i quantitativi acquistati dagli operatori aerei non coincidono necessariamente con quelli fisicamente forniti negli aeroporti europei nello stesso periodo, poiché gli acquisti possono essere effettuati su scala più ampia rispetto al solo mercato dell'Unione Europea e rispondono a logiche di contabilizzazione differenti. Per questo motivo, ai fini della valutazione del grado di raggiungimento degli obiettivi previsti da ReFuelEU Aviation, il dato più rappresentativo risulta essere quello relativo al SAF effettivamente fornito negli aeroporti dell'Unione.

Un ulteriore elemento di interesse riguarda la distribuzione geografica della fornitura di SAF[93]. Sebbene nell'analisi venga riportato soltanto il dato aggregato circa la domanda di SAF da parte degli aeroporti europei, emerge una grande disomogeneità riguardo alla fornitura di SAF tra questi ultimi poiché l'EASA ha dichiarato che "nel 2024 il carburante SAF è stato fornito a 33 aeroporti dell'Unione in 12 Stati membri dell'UE; tuttavia, cinque soli Stati membri – Francia, Paesi Bassi, Spagna, Svezia e Germania – hanno rappresentato il 99% della quantità totale fornita"[93].

Analizzando la tipologia di SAF acquistata, il 96,5% del totale è risultato essere "biocarburante per l'aviazione", il 2,7% non è stato classificato e il restante 0,8% è stato identificato come "altri biocarburanti per l'aviazione". La netta prevalenza dei biocarburanti risulta essere in linea con l'avanzamento tecnologico dei processi di produzione di SAF: come già visto, il principale processo produttivo attualmente utilizzato è l'HEFA, il quale porta proprio alla formazione di biocarburante per l'aviazione[93].

Per quanto riguarda la modalità attraverso cui è stato richiesto e acquistato il SAF, è emerso che il 39% della quantità totale di carburante sostenibile è stato richiesto attraverso EU ETS, il 42% attraverso altri sistemi di misure basate sul mercato (come l'UK ETS) e il restante 19% tramite sistemi non Market-Based Measures (MBM)[93].

Differenza di prezzo tra SAF e carburante fossile

Oltre alla disomogeneità a livello geografico, un ulteriore limite alla crescita della domanda futura di SAF da parte degli operatori aerei è costituito dal grande divario di prezzo tra i carburanti sostenibili per l'aviazione e i carburanti fossili.

Infatti, ricorrere al SAF per le compagnie aeree non è ancora economicamente vantaggioso in quanto questa tipologia di carburante risulta essere circa 3,5 volte più costosa del *Jet fuel* convenzionale[94]. Di conseguenza, è chiaro che gli obblighi riguardo l'utilizzo di SAF individuati dalla normativa comunitaria non si traducono necessariamente in una domanda di SAF da parte delle compagnie aeree.

Facendo riferimento a dati più specifici, in Europa, alla fine del 2025, il prezzo dei SAF si è avvicinato a 3.000 $/t, con una differenza di oltre 2.000 $/t rispetto al carburante per aerei convenzionale. Il divario di prezzo è risultato inferiore negli Stati Uniti, soprattutto in California, grazie alla presenza di incentivi fiscali[95].

In generale, come più volte evidenziato nei precedenti paragrafi, il costo dei SAF è principalmente legato al costo dei *feedstock*: sia gli oli vegetali vergini che i rifiuti ad alto contenuto di cellulosa sono più costosi del cherosene poiché prevedono ulteriori processi di trasformazione prima di poter essere utilizzati come carburanti per gli aeromobili[96].

In questa sede, il differenziale di prezzo viene quindi considerato soprattutto come una barriera strutturale alla crescita della domanda di SAF; l'andamento temporale dei prezzi, le cause congiunturali delle oscillazioni e le variabili che contribuiscono alla formazione del differenziale saranno invece approfonditi nel Capitolo 3.

Offerta di SAF

I dati più recenti riferiti all'Europa descrivono un mercato altamente concentrato e dominato da pochi fornitori. In particolare, nel 2024 sono stati 83 i fornitori di carburante per l'aviazione e 25 di questi hanno segnalato una fornitura totale di 193 kt di SAF. Inoltre, meno di dieci fornitori hanno rappresentato l'80% di tale quantità[93]. Da questi dati emerge che il mercato dei SAF si trova ancora in una fase iniziale, per cui è necessario un particolare impegno da parte degli Stati membri per poter bilanciare la situazione.

Nel 2023 sono stati dodici gli Stati membri dell'UE ad ospitare attività di produzione di SAF, mentre tale numero è cresciuto a diciassette nel 2024[93], sottolineando come sia notevole l'impegno rivolto dall'Unione Europea verso la produzione di carburanti sostenibili per l'aviazione[93].

---

[94] *Neverauskienė, L. O., Sikorskaitė-Narkūnė, E., & Tvaronavičienė, M., The Economics of Sustainable Aviation Fuels: Market Trends and Policy Challenges in Selected EU Countries, 2026.*

[95] *WEF, Global Aviation Sustainability Outlook 2026, 2026.*

[96] *International Council on Clean Transportation (ICCT), Why and How to Bring Down the Cost of SAF, 2025.*

In Figura 2.12 vengono suddivisi gli Stati membri dell'UE in base alla presenza o meno di infrastrutture, operative o annunciate, adibite alla produzione di SAF. In verde sono evidenziati i Paesi che hanno avviato un'attività di produzione di SAF per la prima volta nel 2024.

EU MEMBER STATES WITH AT LEAST ONE OPERATING OR ANNOUNCED SAF FACILITY (EU MEMBER STATES WITH FIRST-TIME SAF ACTIVITY IN GREEN)	EU MEMBER STATES WITH NO OPERATING OR ANNOUNCED SAF FACILITY
Austria, Belgium, Croatia, Denmark, Estonia, Finland, France, Germany, Italy, Latvia, Netherlands, Poland, Portugal, Romania, Slovakia, Spain, Sweden	Bulgaria, Cyprus, Czech Republic, Greece, Hungary, Ireland, Lithuania, Luxemburg, Malta, Slovenia

Figura 2.12: Classificazione degli Stati membri EU in base alla presenza o assenza di infrastrutture produttive di SAF.
Fonte: EASA ReFuelEU Aviation Annual Technical Report 2025

Per poter comprendere in modo preciso la situazione attuale della produzione di SAF a livello europeo, viene riportata l'analisi condotta dall'EASA proprio in merito allo stato del mercato SAF dell'UE, pubblicata all'interno dell'EASA ReFuelEU Aviation Annual Technical Report del 2025[93]. È importante effettuare questa valutazione poiché bisogna comprendere se la capacità produttiva già installata e quella prevista potranno supportare la crescente domanda di carburanti sostenibili sostenuta dalle già citate normative europee.

L'analisi della capacità produttiva europea di SAF è stata condotta in tre fasi:

1) ricerca documentale in merito agli impianti di produzione di SAF operativi e annunciati in ciascuno Stato membro dell'UE: questa fase ha comportato un'ampia raccolta di informazioni pubblicamente accessibili riguardo sia impianti operativi che annunci di progetti;
2) consultazione con le autorità degli Stati membri dell'UE: l'obiettivo di tale fase era quello di confermare (o eventualmente modificare) i dati raccolti nella fase precedente;
3) sviluppo di scenari: questa ultima fase è stata necessaria per potere considerare nell'analisi l'incertezza legata alla effettiva costruzione e operatività dei nuovi impianti produttivi ancora in fase di progetto. Questi scenari si sono basati sul punteggio di maturità assegnato a ciascun progetto di produzione di SAF e ne sono risultati tre: scenario operativo (per punteggio di maturità pari a 5), scenario realistico (per punteggio di maturità pari a 4 o 5) e scenario ottimistico (per punteggio di maturità pari a 3, 4 o 5). In Figura 2.13 si riporta la metodologia di calcolo del punteggio di maturità per ogni progetto di impianto produttivo di SAF.

PROJECT MATURITY SCORE	DESCRIPTION
5	Commercial-scale SAF facility (In service)
4	Facility under construction
3	Main facility attributes announced: technology, feedstock, SAF capacity, commissioning year, location, upstream/downstream partners
2	Only limited information announced (ex. commissioning year and technology disclosed but feedstock, capacity and location are unknown)
1	Very limited information OR Non-ASTM approved pathway

Figura 2.13: Metodologia di calcolo del punteggio di maturità dei progetti di impianti produttivi di SAF. Fonte: EASA ReFuelEU Aviation Annual Technical Report 2025

È stato utilizzato il 2030 come anno di riferimento per la valutazione della capacità produttiva di SAF in quanto rappresenta un punto di riferimento fondamentale ai sensi del regolamento ReFuelEU sull'aviazione.

Dai risultati è emerso che:

- secondo lo scenario operativo, il quale prende in considerazione solo la capacità produttiva degli impianti ad oggi operativi, l'offerta di SAF a livello europeo entro il 2030 ammonta a 1,4 milioni di tonnellate. Il passaggio dalla capacità odierna (circa 1 milione di tonnellate) al dato previsto dallo scenario operativo è principalmente attribuibile alla messa in funzione della raffineria Eni di Gela, per la quale è stata annunciata una capacità operativa massima di 400.000 tonnellate di SAF all'anno[93];
- secondo lo scenario realistico, il quale considera non solo gli impianti ad oggi operativi, ma anche quelli attualmente in costruzione, l'offerta di SAF a livello europeo ammonterebbe a 4,6 milioni di tonnellate entro il 2030. A questo valore si arriva considerando anche l'ampliamento della raffineria spagnola di Moeve Huelva attualmente in costruzione[93];
- secondo lo scenario ottimistico, il quale prende in considerazione non solo la tipologia di impianti di produzione compresi nello scenario realistico, ma anche i progetti ad alta credibilità che hanno divulgato dati chiave per i loro impianti annunciati, l'offerta di SAF a livello europeo si attesta a 5,2 milioni di tonnellate entro il 2030 (escluse le quantità di carburante sintetico per l'aviazione), con un ulteriore 0,7 Mt di carburanti sintetici per l'aviazione[93].

Considerando che la quantità target di SAF (con esclusione dei carburanti sintetici per l'aviazione) prevista dal ReFuelEU Aviation per il 2030 equivale a 2,2 milioni di tonnellate, emerge che tale obiettivo può essere raggiunto soltanto attraverso l'attuazione o dello scenario realistico o dello scenario ottimistico. Di conseguenza, si può affermare che la capacità produttiva odierna è di gran lunga insufficiente a raggiungere gli obiettivi definiti dall'Unione Europea per i prossimi anni ed è quindi necessario lavorare sui tre fattori critici

principali: investimenti costanti in nuovi impianti di produzione, la loro tempestiva messa in funzione e una rapida espansione lungo l'intera catena del valore dei SAF.

Oltre agli impianti produttivi, un altro ostacolo alla diffusione dei SAF è legato ai *feedstock*, ossia alle materie prime necessarie per poter avviare il processo produttivo. Come visto nel Capitolo 1, sono molteplici le tipologie di materie prime utilizzate per la produzione di carburanti sostenibili per l'aviazione e tra queste rientrano gli oli vegetali esausti, i grassi animali, i residui forestali e i rifiuti industriali. A tal proposito, è importante sottolineare che, oltre alla disponibilità geografica, un altro impedimento è rappresentato dalla scalabilità di tali risorse: la domanda di SAF è portata a crescere ad un ritmo sostenuto per i prossimi decenni, ma la disponibilità delle corrispondenti materie prime necessarie non è altrettanto garantita.

Infatti, analizzando la situazione europea in merito alla disponibilità di *feedstock*, emerge che nel 2024, delle materie prime utilizzate per i SAF forniti nell'UE, il 69% proveniva da paesi extra-UE. La Cina da sola ha contribuito per il 38%, mentre la Malesia per il 12%, rappresentando insieme il 50% del totale del 57% proveniente dalla regione Asia-Pacifico. Il restante 39% proveniva da UE, Regno Unito e Stati EFTA, con la Finlandia come principale contributore europeo con il 10%, seguita dal Regno Unito con l'8%. Una piccola parte delle materie prime proveniva dall'America Latina e dai Caraibi (LACAB), dal Medio Oriente e dal Nord America, con l'Arabia Saudita che rappresentava la fonte più significativa con il 2%[93]. È quindi evidente che le importazioni di *feedstock* svolgono ad oggi un ruolo significativo nel panorama dei SAF dell'Unione Europea.

Con la crescente diffusione dei SAF, l'EASA evidenzia anche l'insorgenza di un conseguente rischio legato al commercio di carburanti non conformi agli standard di qualità richiesti. Infatti, all'interno del Safety Information Bulletin "Rischi relativi a carburanti per turbine aeronautiche non conformi alle specifiche"[97] del 2025, viene riportato che "l'elevato costo del SAF rispetto al carburante per aerei fossile può incentivare attività fraudolente, aumentando ulteriormente il rischio di carburante per aviazione non conforme alle specifiche" e, proprio per tale ragione, "l'EASA, insieme alle parti interessate coinvolte nella produzione, fornitura e utilizzo dei combustibili sintetici, sta attualmente conducendo una valutazione dei problemi di sicurezza per identificare i potenziali rischi e adottare misure di mitigazione adeguate".

Entrando in modo più approfondito nel merito della disponibilità e della scalabilità dei *feedstock*, è stato stimato che il potenziale globale di biomassa raggiungerà oltre 12.000 milioni di tonnellate entro il 2050 a causa della crescita demografica e del maggiore accesso ai rifiuti. Tuttavia, solo 1.580 milioni di tonnellate potrebbero essere disponibili per la produzione di biocarburanti sostenibili, sufficienti a supportare poco più di 300 milioni di tonnellate di biocarburanti sostenibili nel 2050. Di conseguenza, tale quantità di *feedstock*

[97] *EASA, Safety Information Bulletin 2025, "Risks Related to Out of Specification Aviation Turbine Fuels".*

non sarebbe sufficiente a produrre i 500 milioni di tonnellate di SAF richieste per il 2050[98], ma sarebbe necessario integrare i biocarburanti con volumi considerevoli di *e-SAF* (ossia carburanti prodotti utilizzando CO_2, acqua ed elettricità da fonti rinnovabili) tramite tecnologie *Power-to-Liquid* (PtL). A tal proposito, a livello globale, si stima che 1.000 milioni di tonnellate di CO_2 biogenica potrebbero supportare la produzione di quasi 200 milioni di tonnellate di *e-SAF* entro il 2050[98]. Tuttavia, raggiungere questo livello di produzione di *e-SAF* richiederebbe il raddoppio dell'attuale capacità globale di energia rinnovabile[98].

L'analisi riguardante la disponibilità globale di *feedstock* per i SAF condotta dall'International Air Transport Association (IATA)[98] nel 2025 si è concentrata su tre categorie di materie prime:

- materie prime da biomassa: includono colture alimentari coltivate specificamente per la bioenergia, scarti, residui e sottoprodotti derivati dal petrolio, nonché residui agricoli e forestali, scarti di legno e rifiuti solidi urbani (definiti "MSW", ossia municipal solid waste);
- materie prime per tecnologie *Power-to-Liquid*: fonti di CO_2 e capacità di energia elettrica rinnovabile per la produzione di idrogeno;
- colture energetiche: colture non alimentari con potenziale per la produzione di biocarburanti[98].

Sono quindi escluse dall'analisi tutte le colture energetiche che comporterebbero un cambiamento diretto o indiretto dell'uso del suolo (come, ad esempio, la conversione deliberata di foreste o pascoli in terreni agricoli) o l'utilizzo di terreni marginali o degradati per la coltivazione a causa dell'incertezza relativa alla disponibilità e al potenziale assorbimento.

Materie prime da biomassa e scalabilità dell'offerta

Dopo aver individuato nel Capitolo 1 la disponibilità dei *feedstock* come uno dei principali vincoli strutturali alla diffusione dei carburanti sostenibili, l'analisi può essere approfondita dal punto di vista quantitativo e di mercato. Ai fini della produzione di SAF, le materie prime da biomassa possono essere ricondotte a tre gruppi principali:

- materie prime di prima generazione (1G): corrispondono a grassi e oli per uso alimentare, i quali hanno un potenziale moderato per la riduzione delle emissioni. Comprendono colza, soia e palma e il loro processo di conversione in HEFA è tecnologicamente maturo ed economicamente vantaggioso;

[98] *IATA, Global Feedstock Assessment for SAF Production, Outlook to 2050 – September 2025.*

- materie prime di seconda generazione (2G): fanno riferimento a grassi, oli e lubrificanti di scarto, i quali hanno un elevato potenziale di riduzione delle emissioni, ma allo stesso tempo una limitata disponibilità. Fanno parte di questa categoria l'olio da cucina esausto (UCO, used cooking oil), grassi animali, grassi industriali e residui come gli effluenti degli oleifici di palma (POME, palm oil mill effluent). Questa tipologia di *feedstock* è considerata più sostenibile rispetto alla precedente per quanto riguarda la produzione di SAF perché ha un maggior potenziale di riduzione dei gas serra e perché non comporta l'uso del suolo. D'altra parte, però, le sue catene di approvvigionamento possono essere meno efficienti e più costose e l'offerta complessiva di materie prime di seconda generazione è limitata dalla dipendenza dai flussi di rifiuti industriali e dalla concorrenza di altri settori del trasporto;
- materie prime di terza generazione (3G): riguardano i rifiuti biologici/agricoli e le colture energetiche provenienti da terreni degradati. Proprio come la precedente tipologia di *feedstock*, questi hanno un elevato potenziale di riduzione delle emissioni e sono anche più abbondanti, ma allo stesso tempo la tecnologia che si basa su queste materie prime è ancora poco sviluppata. Rientrano in questa categoria i rifiuti solidi urbani (MSW, municipal solid waste), i residui agricoli e forestali, le alghe e le colture di copertura coltivate su terreni degradati e marginali. Nella maggior parte dei casi, le relative filiere di approvvigionamento sono ancora in fase di sviluppo o inesistenti. Nel caso dei RSU, esistono filiere di approvvigionamento, ma la materia prima stessa presenta una scarsa omogeneità e richiede ulteriori processi di trasformazione[98].

In merito alla valutazione della disponibilità delle materie prime da biomassa appena elencate, va innanzitutto esclusa la biomassa già destinata ad altri settori primari essenziali, come ad esempio l'agricoltura, l'allevamento e il riciclo. Inoltre, la potenziale disponibilità di materie prime per la produzione di SAF si riduce ulteriormente a seguito dell'allocazione del *feedstock* destinato ai settori energetico e termico, nonché alla produzione di prodotti biochimici e altri biocarburanti, come metanolo e biometano.

Nonostante sia stato evidenziato che le materie prime di terza generazione siano quelle con le maggiori criticità in termini di sviluppo tecnologico e complessità della catena di approvvigionamento, si prevede che la maggior parte delle materie prime utilizzabili provenga proprio da quest'ultima categoria in quanto i vincoli riguardo l'utilizzo del suolo limitano l'utilizzo di materie prime di origine agricola.

Sebbene molte regioni possiedano un abbondante potenziale di biomassa, la natura frammentata della produzione, i siti di generazione sparsi e le infrastrutture sottosviluppate creano notevoli ostacoli a un trasporto e ad un consolidamento efficienti. Queste difficoltà sono ulteriormente aggravate dall'assenza di pratiche di raccolta standardizzate e da infrastrutture di stoccaggio insufficienti. Di conseguenza, emerge una chiara necessità di *hub* di aggregazione intermedi, modelli cooperativi e strumenti di coordinamento digitali

per snellire la logistica e garantire un approvvigionamento costante di materie prime durante tutto l'anno.

Anche la gestione dei rifiuti solidi urbani è particolarmente ostica: prevede la raccolta delle materie prime in entrata, la separazione dei materiali riciclabili, come i metalli, e il trasporto di tali materiali riciclabili verso gli appositi centri di riciclaggio. Tutto questo necessita di un notevole impiego di manodopera per la movimentazione dei rifiuti, con camion per il trasporto dei rifiuti e altri camion per il trasporto dei materiali selezionati. In alcune regioni, esistono tariffe di conferimento come incentivo economico per la separazione dei rifiuti; tuttavia, nella maggior parte delle regioni, le pratiche di gestione dei rifiuti sono ancora in evoluzione.

In Figura 2.14 vengono riportate le disponibilità potenziali di materie prime da biomassa nel 2030 e nel 2050 riguardo *feedstock* non vincolato, *feedstock* destinato al settore della bioenergia e dei biocarburanti e *feedstock* destinato alla produzione di SAF. È stato stimato che la disponibilità potenziale di biomassa a livello globale non vincolata si aggiri intorno ai 10.000 milioni di tonnellate (Mt) nel 2030, per poi aumentare a oltre 12.000 Mt nel 2050, ma, escludendo la biomassa destinata ad altri settori, si prevede che meno del 35% sarà disponibile per la bioenergia e i biocarburanti, stimato in 3.400 Mt nel 2030 e 4.200 Mt nel 2050. La conversione di tutte queste materie prime in SAF porterebbe a un potenziale massimo teorico di oltre 800 Mt nel 2050. Considerando però le esigenze contrastanti dei settori della bioenergia e dei biocarburanti, la biomassa globale potenzialmente accessibile per la produzione di SAF si riduce ulteriormente a circa il 12% del potenziale originario non vincolato e ciò equivale a circa 1.230 milioni di tonnellate entro il 2030 e 1.580 milioni di tonnellate entro il 2050. Qualora sfruttate pienamente, queste risorse potrebbero supportare la produzione di oltre 300 milioni di tonnellate di bio-SAF nel 2050[98].

Emerge, inoltre, che circa il 58% delle potenziali materie prime di biomassa disponibili per la produzione di SAF proverrà da residui agricoli, il 16% da residui forestali e scarti di legno e il 15% da rifiuti solidi urbani. Le materie prime di origine agricola e gli oli esausti sono attualmente le uniche materie prime utilizzate nella produzione commerciale di biocarburanti e rappresenteranno probabilmente l'11% delle materie prime di biomassa utilizzate per produrre SAF nel 2050[98].

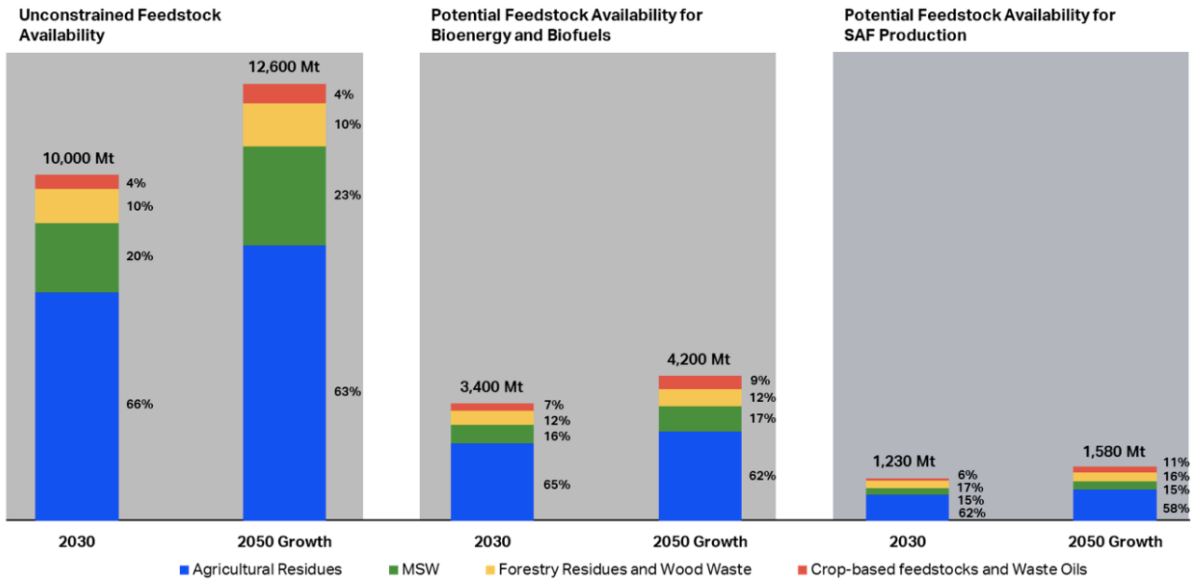


Figura 2.14: Disponibilità potenziale di materie prime da biomassa a livello globale per la produzione di SAF nel 2030 e nel 2050.
Fonte: IATA, Global Feedstock Assessment for SAF Production: Outlook to 2050, 2025

Per poter comprendere il contributo dei vari Paesi a tale disponibilità di *feedstock* da biomassa, in Figura 2.15 vengono riportate le disponibilità per il 2030 e per il 2050 associate ai Paesi o alle aree geografiche più produttive.

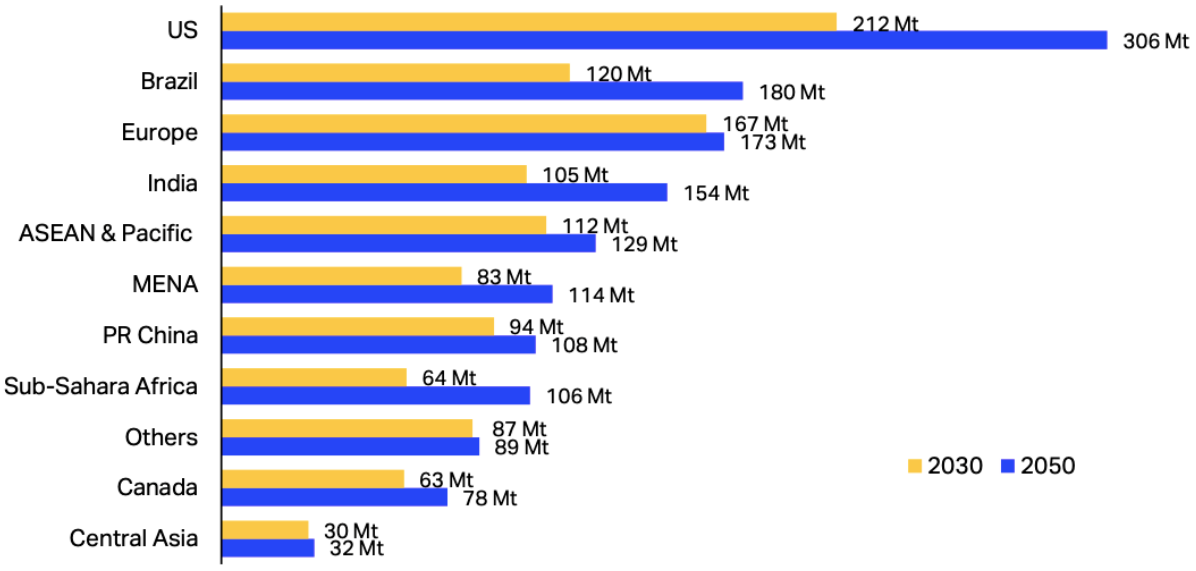


Figura 2.15: Disponibilità potenziale regionale di biomassa per la produzione di SAF nel 2030 e nel 2050.
Fonte: IATA, Global Feedstock Assessment for SAF Production: Outlook to 2050, 2025

Risulta quindi evidente che le regioni la cui produzione di *feedstock* da biomassa risulta maggiore sono Stati Uniti, Brasile, Europa e India. Infatti, la somma delle loro produzioni di biomassa raggiungerà oltre il 50% della disponibilità totale globale. Anche la Repubblica Popolare Cinese e l'Associazione delle Nazioni del Sud-est asiatico (ASEAN), in particolare Indonesia e Malesia, dovrebbero emergere come importanti fonti di approvvigionamento, rappresentando circa il 15% del totale. Infatti, tali Paesi presentano industrie di biocarburanti già sviluppate, offrendo un grande potenziale per la produzione di SAF da biomassa. Le stime di crescita sono principalmente supportate da una maggiore produzione di oli esausti e rifiuti solidi urbani dati dalla crescita demografica, da infrastrutture consolidate e da una domanda orientata verso la produzione di SAF[98].

Materie prime per tecnologie *Power-to-Liquid*

Per quanto riguarda le materie prime per tecnologie *Power-to-Liquid*, si fa riferimento alla CO_2 catturata e a idrogeno prodotto tramite elettrolisi, utilizzando energia rinnovabile. L'anidride carbonica, a livello globale, è disponibile in quantità abbondante soprattutto da fonti industriali, ma a rappresentarne un limite è la convenienza economica della sua cattura. Attualmente, solo la cattura su larga scala di CO_2 ad alta purezza è considerata economicamente sostenibile e, di conseguenza, solo circa il 20% delle emissioni globali di CO_2 industriale è economicamente vantaggioso da catturare[98].

La produzione di *e-SAF* richiede un'ampia fornitura di energia rinnovabile oltre alla CO_2 e, con l'avanzare della transizione energetica globale, i progetti *Power-to-Liquid* saranno sempre più in competizione con la crescente domanda globale di energia rinnovabile. Le regioni con una significativa capacità installata di energia rinnovabile e il potenziale per aumentarla ulteriormente, come la Repubblica Popolare Cinese, gli Stati Uniti e il Brasile, avranno probabilmente una maggiore capacità di facilitare la produzione di *e-SAF* e contribuire a definire il percorso verso questa transizione. Un aspetto importante da considerare è il prezzo dell'energia rinnovabile, che può variare a seconda delle condizioni regionali e del progetto.

Infine, anche l'acqua viene utilizzata nella produzione di *e-SAF* e la sua disponibilità determinerà probabilmente la localizzazione geografica degli impianti PtL. Le regioni costiere e le aree dotate di infrastrutture di trasporto adeguate a soddisfare il fabbisogno idrico per la produzione di idrogeno tramite desalinizzazione saranno probabilmente le zone dominanti in questo processo produttivo. È importante notare che l'utilizzo di acqua dolce come materia prima per la produzione di idrogeno sarà probabilmente limitato, dato il crescente numero di aree a rischio idrico in tutto il mondo.

Quindi, nonostante il significativo potenziale globale di energia rinnovabile, soddisfare il fabbisogno di energia rinnovabile dei carburanti PtL (e in particolare degli *e-SAF*) e i relativi criteri sarà una sfida, poiché sarà necessario un aumento sostanziale della capacità rinnovabile.

Dall'analisi è emerso che se le fonti industriali di CO_2 continuassero ad essere accettate nell'ambito dei quadri normativi sulla sostenibilità, sarebbe possibile catturare in modo economicamente vantaggioso oltre 5.000 milioni di tonnellate di CO_2 industriale[98]. Tuttavia, le attuali normative sulla sostenibilità industriale in alcune aree, come l'Europa, ne limitano il potenziale. Per tale ragione, queste regioni stanno promuovendo l'uso di CO_2 biogenica[98].

Considerando solo le fonti biogeniche esistenti, la disponibilità totale stimata è limitata a circa 1.000 Mt di CO_2, prodotta rispettivamente dalle varie aree geografiche come riportato in Figura 2.16. Con le attuali tecnologie di cattura del carbonio che operano a un'efficienza di circa il 90%, oltre 900 Mt di CO_2 biogenica potrebbero quindi essere catturate e potenzialmente reindirizzate per la produzione di SAF. L'utilizzo di tutto ciò consentirebbe la produzione di una quantità stimata di 170-200 Mt di *e-SAF* nel complesso[98].

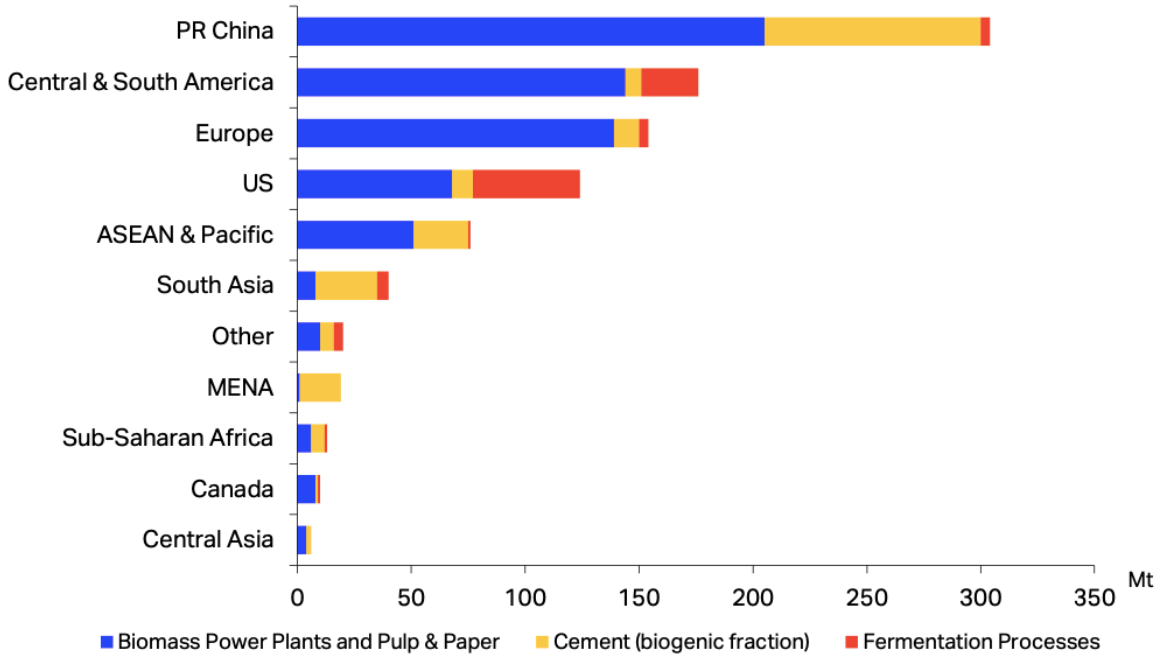


Figura 2.16: Disponibilità di CO_2 biogenica in Mt nel 2050.
Fonte: IATA, Global Feedstock Assessment for SAF Production: Outlook to 2050, 2025

In conclusione, è improbabile che la tecnologia *Power-to-Liquid* porti alla produzione di grandi volumi di *e-SAF* nel 2030, ma si prevede un aumento significativo entro il 2050. Questo percorso produttivo non è privo di difficoltà e richiederà un grande consumo di energia rinnovabile. Senza considerare altri settori concorrenti, la capacità globale di generazione di energia rinnovabile dovrebbe quasi raddoppiare per produrre fino a 200 milioni di tonnellate di *e-SAF*[98].

Disponibilità di materie prime per i SAF a livello europeo

A livello europeo, il settore dei biocarburanti e quello delle bioenergie risultano essere ben sviluppati in quanto sono già disponibili applicazioni di cogenerazione della biomassa solida. Se però le colture possono essere sfruttate nell'ambito del trasporto su strada, non vale esattamente lo stesso per quanto riguarda l'ambito dei SAF. In particolare, per la produzione di carburanti sostenibili per l'aviazione, possono essere utilizzati rifiuti e residui come oli esausti, residui agricoli e forestali e rifiuti solidi urbani, ma non colture alimentari[98].

Si prevede che la disponibilità di biomassa in Europa seguirà una crescita limitata tra il 2030 e il 2050, attestando il volume potenziale rivolto ai SAF a 167 milioni di tonnellate nel 2030 e a 173 milioni di tonnellate nel 2050, con una differenza di sole 6 milioni di tonnellate in venti anni. La percentuale maggiore di tali materie prime sarà rappresentata dai residui agricoli (circa il 70%), seguiti poi dai residui forestali (circa il 18%) e dai rifiuti solidi urbani (circa il 10%)[98].

Infine, va sicuramente citata la problematica rappresentata dalla concorrenza per le risorse di origine biologica da parte di altri mercati, come la produzione di energia, inclusi i sistemi di teleriscaldamento e le centrali elettriche nell'Europa nord-occidentale. Per potere parzialmente risolvere tale ostacolo, sarebbe necessario riconoscere che il settore aeronautico è sia molto inquinante che difficile da decarbonizzare e, per tale motivo, non dovrebbe essergli negata la disponibilità di tali risorse. Inoltre, un ulteriore contributo all'innalzamento dei prezzi dell'elettricità è stato dato dalla dipendenza dell'Europa dall'energia importata, fenomeno che può rappresentare un ostacolo significativo alla produzione competitiva di *e-SAF*[98].

Il fatto che la domanda di SAF venga assicurata nel tempo, grazie al sostegno della normativa europea, dovrebbe incentivare i produttori di SAF a costruire ulteriori impianti produttivi, ma attualmente questo non è risultato sufficiente. Tale motivo, unito al problema della quantità abbastanza limitata di *feedstock* disponibile in Europa, suscita preoccupazioni circa l'allineamento tra domanda e offerta di SAF in UE per i prossimi anni.

A tal proposito, uno studio pubblicato su Nature Communications ha evidenziato che il "realization gap", ossia la differenza tra la capacità operativa di SAF annunciata e quella effettiva, sta aumentando nel tempo. Infatti, se nel 2023 tale gap si attestava a 4,04 Mt anno a livello globale e 0,81 Mt anno−1 in UE, nel 2024 è cresciuto rispettivamente a 6.92 Mt/anno e 1.66 Mt/anno in 2024. A causa delle difficoltà tecnologiche per la produzione di SAF, costi elevati, mancanza di competitività, regolamentazione limitata e vincoli di materia

prima, nel 2024 solo il 24% a livello globale e il 26% in UE della capacità produttiva annunciata è diventata operativa nei tempi previsti[99].

2.5.2 Settore marittimo

Per quanto riguarda il settore marittimo, le sfide inerenti alla sua decarbonizzazione sono ancora più ardue poiché, ad oggi, lo sviluppo tecnologico delle alternative ai combustibili fossili individuate risulta essere ancora ad uno stato iniziale, non essendoci un'unica soluzione su cui puntare. Inoltre, a ciò si aggiunge anche la problematica relativa alla compatibilità dei combustibili sostenibili con la flotta esistente, la quale risulta inferiore rispetto ai SAF, che sono invece concepiti come *drop-in fuels*.

Domanda di carburanti sostenibili

Sebbene la normativa europea fissi degli obiettivi ben precisi per quanto riguarda la decarbonizzazione del settore marittimo, occorre considerare che le sfide per questo settore sono molto impegnative. Infatti, come evidenziato in precedenza, ad ostacolare l'utilizzo di carburanti sostenibili per il trasporto marittimo vi è sia una scarsa maturità tecnologica delle soluzioni alternative, che una lunga durata del ciclo di vita delle navi attualmente operative. Di conseguenza, è da considerare che il passaggio a nuove tecnologie di alimentazione richiederà tempo, anche se i motori a doppia alimentazione (*dual-fuel engines*) sono disponibili in commercio.

Inoltre, il raggiungimento degli obblighi individuati principalmente dal FuelEU Maritime richiederà un accesso sostanziale all'elettricità rinnovabile (per la produzione di *e-fuel*) e ai biocarburanti, ma il settore marittimo non è l'unico a contendersi tali risorse.

Nel 2023, le navi di stazza lorda pari o superiore a 5.000 GT operanti nel commercio internazionale hanno utilizzato 211 milioni di tonnellate di carburante, il cui 93,5% è stato rappresentato da carburanti di origine fossile quali olio combustibile pesante, olio combustibile leggero e gasolio/diesel. Il 6% del carburante utilizzato è stato invece GNL, il cui utilizzo è aumentato del 17% rispetto al 2022. L'utilizzo di biocarburanti nel settore marittimo si è attestato a 0,7 Mtoe nel 2023, confermando un aumento significativo dell'utilizzo di biocarburanti[18].

[99] *Alessandro Martulli, Kristin Brandt, Florian Allroggen e Robert Malina, "The potential scale-up of sustainable aviation fuels production capacity to meet global and EU policy targets", Nature Communications.*

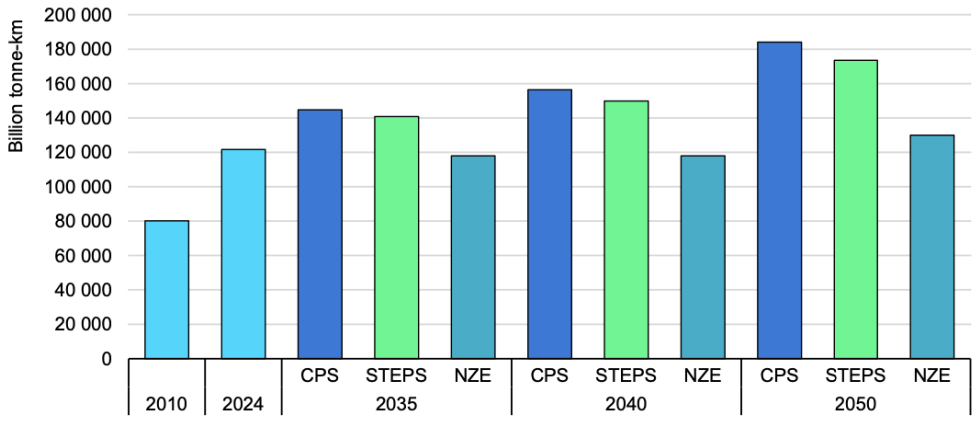


Figura 2.17: Proiezioni dell'attività di trasporto marittimo internazionale per scenario. Fonte: IEA

Grazie però alle normative internazionali europee e degli obiettivi net-zero delle compagnie di navigazione, la domanda di *low-GHG fuels* è destinata a crescere nel settore marittimo. Secondo le stime effettuate dall'IEA nel novembre del 2025, l'attività di spedizione internazionale tenderà a crescere entro il 2050 rispetto ai livelli registrati nel 2024 in ognuno dei tre scenari individuati (cfr. Figura 2.17): CPS (Current Policies Scenario), STEPS (Stated Policies Scenario) e NZE (Net Zero Emissions) che richiede alle navi che emettono gas serra al di sopra della soglia annuale stabilita di ottenere "unità compensative" o di acquisire "unità in eccedenza" a un prezzo massimo da navi che emettono al di sotto degli obiettivi)[100]. Di conseguenza, anche la potenziale domanda di combustibili a basse emissioni di gas serra vedrà un aumento significativo in modo da poter conciliare l'aumento del commercio con gli obiettivi di decarbonizzazione. È opportuno evidenziare la traiettoria dello scenario NZE, in quanto prevede una temporanea riduzione dell'intensità dell'attività nel prossimo decennio prima di tornare a crescere, a differenza di CPS e STEPS che mostrano una crescita lineare e ininterrotta. Questo è dovuto principalmente al fatto che ad oggi il settore marittimo utilizza principalmente combustibili fossili; quindi, la loro progressiva eliminazione riduce inizialmente l'attività totale.

[100] *IEA, Shipping in the World Energy Outlook 2025, 2025.*

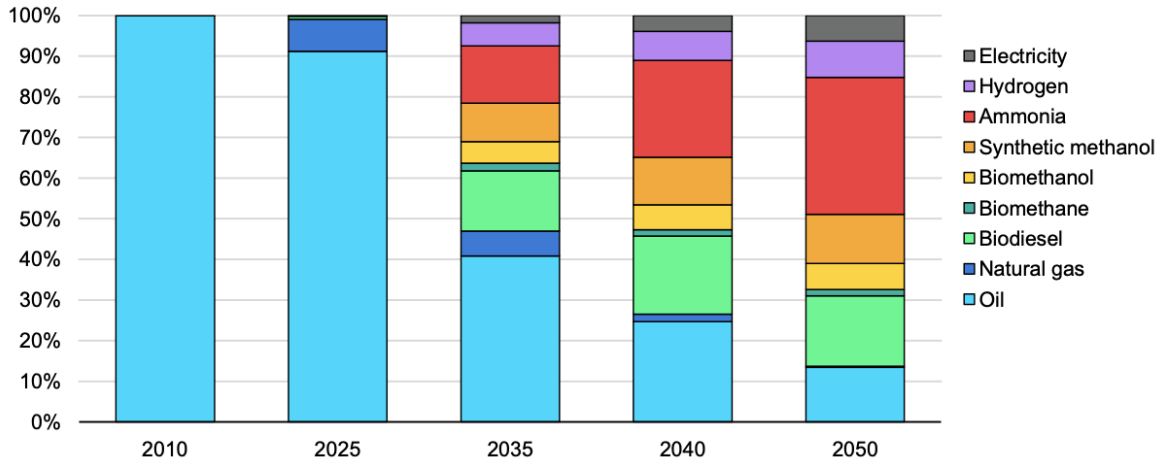


Figura 2.18: Domanda energetica per il trasporto marittimo internazionale nello scenario Net Zero Emissions entro il 2050.
Fonte: IEA

Per quanto riguarda il mix energetico di tale domanda, la percentuale di combustibili sintetici (idrogeno, ammoniaca, metanolo sintetico) e biocarburanti (bioetanolo, biometano, biodiesel) tenderà sempre più a crescere a livello globale, attestandosi rispettivamente al 60% e al 25% del totale del carburante entro il 2050[100] (cfr. Figura 2.18).

Differenza di prezzo tra carburanti sostenibili e carburanti fossili

Anche in questo caso, come per il settore aeronautico, la domanda di carburanti sostenibili è fortemente influenzata dal loro prezzo. Infatti, attualmente, il prezzo dei *low-GHG fuels* continua ad essere superiore rispetto al carburante convenzionale e questo, aggiungendosi al problema della difficile compatibilità con le navi attualmente operative, disincentiva gli operatori navali ad adottarli. In particolare, l'IEA afferma che "i combustibili liquidi e gassosi sostenibili sono generalmente più costosi delle loro controparti fossili, ad esempio circa 3,8 volte di più nel caso dell'idrogeno elettrolitico, 2,7 volte di più per l'ammoniaca elettrolitica e 3,7 volte di più per il biometanolo"[101].

Tali valori dipendono dalla disponibilità delle materie prime, dal costo dell'elettricità rinnovabile, dalla regione considerata e dal livello di sviluppo delle infrastrutture. In questa sede, il prezzo viene quindi considerato come una barriera alla domanda e alla scalabilità dei carburanti sostenibili nel trasporto marittimo; il confronto quantitativo tra combustibili alternativi, VLSFO e rispettive componenti di costo sarà sviluppato nel Capitolo 3.

[101] *IEA, Delivering Sustainable Fuels - Pathways to 2035, 2025.*

Offerta di carburanti sostenibili

Per poter sostenere la domanda futura di carburanti sostenibili da parte del settore marittimo è necessario che vengano superati gli ostacoli ad essi relativi in termini di costi, maturità tecnologica ed esigenze infrastrutturali. Attualmente, i biocarburanti rappresentano l'alternativa ai combustibili fossili più sviluppata ed economicamente vantaggiosa, con etanolo e biodiesel che hanno raggiunto la parità di costo in alcuni mercati, ma si stanno sviluppando molte altre tecnologie promettenti.

Nel 2025, l'ente norvegese di certificazione e classificazione navale DNV ha pubblicato una valutazione dello stato e dei piani di produzione dei combustibili a basse emissioni di gas serra (*low-GHG fuels*) utilizzati nel trasporto marittimo, in particolare ammoniaca, metanolo e idrogeno, biometano e biodiesel. L'analisi è stata condotta sulla base di stime dei volumi di produzione esistenti e annunciati in UE, considerando differenti probabilità di accadimento per la produzione pianificata.

Dalle stime è emerso che la capacità produttiva totale stimata di *low-GHG fuels* (per tutti i settori) per il 2030 in UE si attesta tra 70 e 100 Mtoe (Milioni di tonnellate equivalenti di petrolio), che corrisponde ad un aumento del 50% rispetto alle stime effettuate nel 2024, grazie all'inclusione del biometano tra i *low-GHG fuels*. Non considerando il volume di biodiesel, la capacità produttiva totale stimata di questi carburanti a basse emissioni per il 2030 è compresa tra 50 e 80 Mtoe e, entro il 2032, la metà della stima più alta riguarda idrogeno e ammoniaca[18].

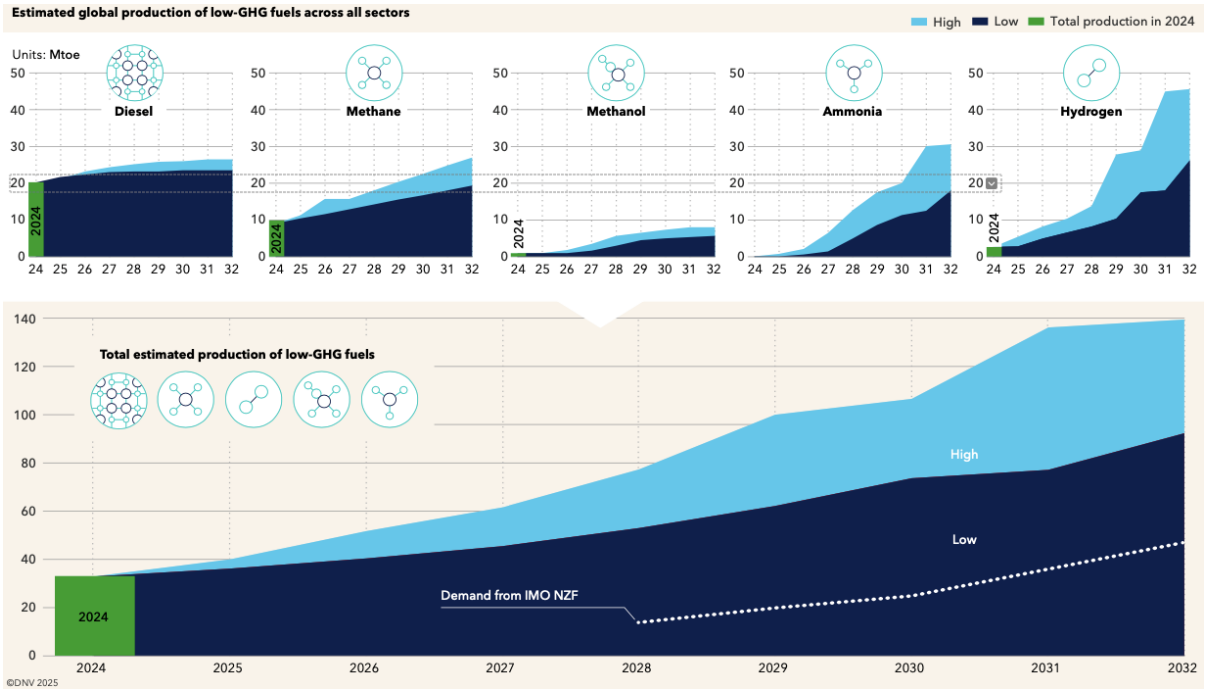


Figura 2.19: Stime della produzione globale di low-GHG fuels per il 2032.
Fonte: DNV

Si prevede però che una parte significativa della capacità produttiva, soprattutto quella riguardante l'idrogeno e i suoi derivati, che dovrebbe essere disponibile entro il 2030 subirà dei ritardi a causa dell'incertezza di mercato.

In Figura 2.19 vengono riportate le stime riguardo alla produzione globale per ogni tipologia di combustibili a basse emissioni di gas serra. Come riportato all'interno del DNV Maritime Forecast to 2050, "queste stime, sia massime che minime, si basano sull'attuale capacità produttiva, inclusa una capacità produttiva stimata e ponderata in base alla probabilità, tenendo conto dello stato di avanzamento di tutti i progetti in fase di sviluppo che soddisfano i criteri di sostenibilità stabiliti dall'UE nella seconda Direttiva sulle energie rinnovabili RED II. È inclusa anche la domanda stimata di combustibili a basse emissioni di gas serra derivante dal trasporto marittimo, in virtù del quadro normativo Net-Zero dell'IMO"[18].

Come visto per il settore aeronautico, anche in questo caso a frenare la crescita della capacità produttiva di *low-GHG fuels* ci sono una serie di fattori, tra cui costi lungo la catena di approvvigionamento, disponibilità di *feedstock* e domanda fluttuante ed incerta. Di conseguenza, è stato registrato che, attualmente, solo circa il 4% dei progetti di combustibili a basse emissioni di gas serra derivati dall'idrogeno ha raggiunto con successo la Decisione Finale di Investimento (FID), con una quota ancora minore, pari a circa l'1%, che ha raggiunto lo stato operativo[18].

Nel settore marittimo, come più volte evidenziato in precedenza, non esiste una categoria unitaria equivalente ai SAF, ma una pluralità di combustibili a basse emissioni di gas serra, ciascuno caratterizzato da specifiche materie prime o input energetici. Per questo motivo, la disponibilità dei *feedstock* deve essere valutata distinguendo tra biocarburanti liquidi, biocarburanti gassosi, idrogeno elettrolitico e combustibili sintetici.

Per quanto riguarda la disponibilità di *feedstock*, la sua valutazione dipende dalla tipologia di carburante sostenibile considerata. I biocarburanti liquidi (HVO, FAME, bio-metanolo) sono l'alternativa che presenta una problematica maggiore in merito alla disponibilità di materie prime poiché l'Unione Europea (e anche altri Paesi) ha stabilito limiti massimi consentiti circa la quota di biocarburanti derivati da mangimi e alimenti. Infatti, le materie prime utilizzate per la produzione di biocarburanti liquidi sono colture agricole (ad esempio mais, canna da zucchero, olio di soia, olio di palma e olio di colza), oli e grassi di scarto e residui (ad esempio olio da cucina esausto e sego). La disponibilità di materie prime derivate da oli e grassi di scarto è limitata e le possibilità di espansione potrebbero esaurirsi quasi completamente entro il 2030[101].

Infatti, uno studio pubblicato sullo European Journal of Management, Economics and Business ha evidenziato che la continua evoluzione delle normative europee circa la decarbonizzazione del settore dei trasporti genera degli shock di domanda che difficilmente possono essere sostenuti dal lato dell'offerta. In merito alla produzione di HVO, l'offerta della materia prima da esso utilizzata (olio da cucina esausto) risulta essere relativamente inelastica, di conseguenza la sua scalabilità è limitata nel breve termine e c'è il rischio di

etichettatura fraudolenta di oli differenti e di lacune nella verifica della sostenibilità nei principali paesi esportatori, tra cui Cina, Malesia e Indonesia[102].

Invece, secondo recenti valutazioni, la disponibilità di *feedstock* non risulta essere un problema per i biocarburanti gassosi come biogas e biometano, il cui potenziale di materie prime è stato stimato in quasi 1.000 miliardi di metri cubi di gas naturale equivalente all'anno (circa 36 EJ/anno), utilizzando le attuali tecnologie di digestione anaerobica. Circa l'80% di questo potenziale si trova nei mercati emergenti e nelle economie in via di sviluppo, guidati da Brasile, Cina e India; l'Unione Europea sta già sfruttando il 40% del suo potenziale, mentre in Cina il tasso è inferiore al 10% e in India è del 5%. Per questa tipologia di carburanti sostenibili emerge però la sfida logistica circa la vicinanza delle materie prime agli impianti di produzione. Alcuni approcci innovativi stanno emergendo per affrontare questo problema, ad esempio i modelli *hub-and-spoke* per l'aggregazione delle materie prime in Danimarca[101].

Anche l'idrogeno elettrolitico non è limitato dalla disponibilità di materie prime, bensì dall'accesso a fonti di elettricità a basso costo e a basse emissioni e dai costi di investimento relativamente elevati degli elettrolizzatori. Infatti, la materia prima di riferimento è l'acqua, che può essere fornita anche alle regioni che soffrono di scarsità idrica attraverso la desalinizzazione dell'acqua di mare, ma il processo di conversione in idrogeno è fortemente influenzato dal prezzo dell'elettricità. L'idrogeno elettrolitico viene utilizzato per la produzione di ammoniaca, e-metanolo ed e-metano, tutti carburanti sostenibili per il trasporto marittimo.

Infine, è importante analizzare anche la disponibilità di CO_2 poiché risulta essere un elemento necessario per la produzione di tutti i combustibili sintetici sopra elencati, ad eccezione dell'ammoniaca. Secondo l'International Energy Agency (IEA), "la CO_2 può essere ottenuta catturando CO_2 biogenica (ad esempio dalla fermentazione dell'etanolo o dalla digestione anaerobica del biogas), con costi ed emissioni contenuti, ma la disponibilità è attualmente limitata e frammentata. Altre tecnologie emergenti, come la cattura diretta dall'aria (DAC), offrono potenzialmente una fornitura illimitata di CO_2, ma i livelli di maturità tecnologica sono bassi e i costi molto elevati. Oggi, vengono catturati poco più di 2 milioni di tonnellate di CO_2 biogenica all'anno, principalmente da unità di fermentazione in impianti di bioetanolo negli Stati Uniti e in Europa, grazie alle loro elevate concentrazioni di CO_2 e al conseguente basso costo di cattura (20-30 dollari/tCO_2 per purificare e comprimere 1 tonnellata di CO_2), con progetti su larga scala che catturano e stoccano 200-500 kt di CO_2 all'anno"[101]. Di conseguenza, la CO_2 è abbondante in termini teorici, ma la disponibilità di CO_2 catturabile in modo economicamente sostenibile è oggi ancora limitata.

[102] *European Journal of Management, Economics and Business, "Price Dynamics of Renewable Diesel HVO (UCO) in Europe: A Review of Supply, Demand, and Policy Determinants", 2026.*

2.6 Investimenti, infrastrutture, logistica e *supply chain*

Come analizzato nel paragrafo 1.7, la scalabilità dei carburanti sostenibili non dipende soltanto dalla maturità tecnologica, ma anche dalla capacità di superare vincoli strutturali legati a investimenti, infrastrutture, logistica e coordinamento della *supply chain*. Dopo l'analisi di domanda e offerta svolta nella sezione precedente, questa sezione approfondisce quindi il ruolo degli attori industriali chiamati a rendere concretamente possibile tale scalabilità.

2.6.1 Ruolo di aeroporti, porti e gestori aeroportuali

Per quanto riguarda il settore aeronautico, il ruolo degli aeroporti è tutt'altro che marginale all'interno della sfida alla decarbonizzazione. Infatti, questi ultimi sono in grado di instaurare e portare avanti delle partnership sia con i fornitori di SAF che con le compagnie aeree volte a facilitare l'approvvigionamento di carburante sostenibile. Inoltre, gli aeroporti hanno anche la capacità di investire in infrastrutture avanzate, come ad esempio impianti di miscelazione e oleodotti dedicati, per agevolare l'adozione dei SAF, anche attraverso la collaborazione con istituzioni pubbliche ed enti governativi.

In questo senso, le esperienze europee mostrano quattro principali canali di intervento. Il primo è l'incentivo economico diretto, attraverso il quale l'aeroporto contribuisce a coprire una parte del sovrapprezzo dei SAF rispetto al cherosene convenzionale. Il secondo è la modulazione delle tariffe aeroportuali, ad esempio tramite riduzioni delle *landing charges* o meccanismi *bonus/malus* legati alle emissioni. Il terzo riguarda gli interventi infrastrutturali e logistici, che riducono i costi di stoccaggio, movimentazione e integrazione del carburante sostenibile nella *fuel supply chain* aeroportuale. Il quarto è la partecipazione, diretta o indiretta, a progetti industriali di produzione, *offtake* o sperimentazione tecnologica. Questi canali non sono alternativi, ma spesso complementari: gli aeroporti più attivi tendono infatti a combinare misure di domanda, investimenti nella *supply chain* e cooperazione con produttori, compagnie e istituzioni pubbliche.

Esperienze europee: aeroporti e gestori aeroportuali

Heathrow Airport

Nel caso di Heathrow, le misure adottate a sostegno dei SAF possono essere considerate tra le più avanzate in Europa, perché hanno prodotto risultati misurabili già nel breve periodo. L'aeroporto londinese di Heathrow nel 2022 ha introdotto un sistema di incentivi, basato

sulla sovvenzione del 50% del sovrapprezzo di SAF attraverso una parte della tassa sulle emissioni di NO_x, per facilitare l'adozione di carburanti sostenibili[103].

Heathrow ha dichiarato che tale sistema di incentivi ha portato le compagnie aeree ad utilizzare circa 70.000 tonnellate di SAF a Heathrow nel 2023, che corrispondono a circa l'1% del carburante totale utilizzato nello stesso aeroporto[104].

Nel 2024 tale volume è aumentato fino a circa 180.000 tonnellate, pari al 2,5% del carburante rifornito a Heathrow, con una riduzione stimata superiore a 630.000 tonnellate di emissioni di carbonio generate dai voli[105]. Da questo punto di vista, la misura può essere considerata efficace perché non ha eliminato il problema del costo del SAF, ma ha aumentato in modo concreto i volumi utilizzati.

Nel 2025 Heathrow ha rafforzato ulteriormente il programma, prevedendo un obiettivo del 3% di SAF sul carburante rifornito nello scalo, con un fondo stimato di circa 86 milioni di sterline e un incentivo pari a 460 GBP per tonnellata, cioè circa la metà del premium stimato rispetto al carburante fossile[106]. Heathrow ha dichiarato che nel 2025 il SAF ha rappresentato il 3,1% del carburante rifornito, contribuendo a evitare oltre 600.000 tonnellate di CO_2eq[107]. Il programma prosegue nel 2026 con l'ambizione di puntare a sostenere un'ulteriore quota volontaria di SAF pari al 2% oltre il mandato britannico del 3,6%, per un target complessivo potenziale del 5,6% del carburante rifornito nello scalo[108].

Schiphol Group

Un altro esempio riguarda l'aeroporto olandese di Schiphol, il quale non ha agito soltanto sul prezzo del SAF, ma ha cercato di intervenire su tutta la filiera. Tra gli strumenti adottati ci sono gli incentivi per la domanda, fornitura alle compagnie, investimento in produzione futura e sperimentazione tecnologica. Dal 2022 Schiphol ha fornito SAF a diverse compagnie aeree, tra cui Air France, KLM, Delta, Ryanair, Transavia e DHL[109].

Per incentivare la diffusione dei SAF, Schiphol Group ha introdotto un programma di sostegno economico tra il 2022 e il 2024, destinato alle compagnie che scelgono di utilizzare carburanti sostenibili. Il programma prevede contributi pari a 500 euro per tonnellata di SAF e 1.000 euro per tonnellata di carburanti sintetici. Secondo i dati disponibili, il programma ha sostenuto l'utilizzo di oltre 40.000 tonnellate di SAF da parte delle compagnie

---

[103] *ICF, The role of airports in scaling up Sustainable Aviation Fuel (SAF), 2024.*
[104] *Heathrow Airport. Sustainable Aviation Fuel (SAF).*
[105] *Heathrow Airport, Connecting People and Planet – 2024 Progress Summary, 2025.*
[106] *Heathrow Airport, Sustainable Aviation Fuel Incentive in Heathrow Aeronautical Charges, 2025.*
[107] *Heathrow SP Limited, Results for the year ended 31 December 2025, 2026.*
[108] *Heathrow Airport, Gateway to Growth – Environmental Commitments, sezione "SAF incentive".*
[109] *Royal Schiphol Group, Annual Report - Environment and society, 2025.*

partecipanti nel periodo considerato[110]. Inoltre, viene incentivato l'utilizzo di aeromobili più silenziosi e puliti attraverso l'offerta di tariffe di decollo e atterraggio ridotte[111].

Il gestore aeroportuale Royal Schiphol Group ha partecipato anche a iniziative volte a rafforzare la filiera produttiva, come il progetto DSL-01 di SkyNRG a Delfzijl[112], pensato per produrre SAF tramite tecnologia HEFA a partire da grassi e oli residui[113]. Il progetto prevede, una volta operativo, una capacità di circa 100.000 tonnellate di SAF all'anno e 35.000 tonnellate di sottoprodotti sostenibili[113]. È importante sottolineare che questo progetto non ha ancora prodotto effetti immediati sui volumi disponibili nel biennio 2024-2025, infatti la fase di costruzione è iniziata nel 2026 e i primi volumi sono attesi nel 2028[113].

Schiphol è inoltre coinvolto nel progetto Synkero, finalizzato alla realizzazione di un impianto nel porto di Amsterdam per la produzione di carburante sintetico a partire da idrogeno verde e CO_2. Il progetto prevede una capacità potenziale di circa 50.000 tonnellate annue di SAF sintetico e sfrutta la vicinanza infrastrutturale tra il porto di Amsterdam e l'aeroporto, anche attraverso il collegamento con le infrastrutture esistenti di trasporto del carburante[114].

Un ulteriore elemento della strategia di Schiphol è rappresentato dal progetto europeo TULIPS, coordinato da Schiphol Nederland B.V. e finanziato nell'ambito di Horizon 2020. Il progetto, avviato nel 2022 e previsto fino al 2026, coinvolge 29 partner e prevede 17 dimostrazioni in aeroporti europei, tra cui Amsterdam Schiphol, Oslo, Torino e Larnaca[115]. TULIPS non riguarda soltanto i SAF, ma più in generale la riduzione delle emissioni aeroportuali attraverso soluzioni su carburanti sostenibili, idrogeno, elettrificazione, economia circolare e logistica[115]. Il suo valore principale è quindi quello di trasformare l'aeroporto in un laboratorio operativo per testare soluzioni replicabili su scala europea.

Nel 2025 Schiphol Group ha dichiarato di aver ricevuto in media il 2% di SAF sul carburante complessivamente fornito, in linea con l'obbligo minimo introdotto da ReFuelEU Aviation a partire dal 2025. Questo risultato indica che la filiera aeroportuale è stata in grado di adeguarsi al primo livello del mandato europeo[109].

SEA Milan Airports

Per quanto riguarda l'Italia, SEA, società di gestione degli aeroporti di Milano Linate e Milano Malpensa, ha confermato anche per il 2024 il programma di supporto economico

---

[110] Schiphol. (n.d.). More sustainable fuels, 2026

[111] ACI Europe, Sustainable Aviation Fuels Financial Support/Incentives Tracker of European Airports.

[112] Schiphol Newsroom, Schiphol to invest in Europe's first sustainable kerosene plant.

[113] SkyNRG, SkyNRG Delfzijl (DSL-01).

[114] Schiphol Newsroom, Synkero builds facility in the port of Amsterdam, producing sustainable aviation fuel from CO_2.

[115] European Commission CORDIS, TULIPS Project.

rivolto alle compagnie aeree che utilizzano carburanti sostenibili per l'aviazione. L'iniziativa si inserisce in un percorso già avviato nel 2021, quando SEA ha sottoscritto un accordo con Eni per la fornitura di biocarburanti destinati al settore aeronautico. Nel 2023 il gestore aeroportuale aveva riconosciuto un contributo pari a 500 euro per tonnellata di "SAF puro" acquistato dalle compagnie ed effettivamente erogato presso gli aeroporti di Linate e Malpensa, con l'obiettivo di coprire parte dell'extracosto che ancora caratterizza i SAF rispetto al carburante tradizionale[111]. In vista dell'entrata in vigore ReFuelEU Aviation, SEA ha rafforzato il programma per il 2024, aumentando il contributo unitario a 800 euro per tonnellata di SAF puro e portando il fondo complessivo disponibile a 500.000 euro. Il programma prevede inoltre due finestre di accesso, ad aprile e luglio, per favorire la partecipazione di un numero più ampio di compagnie, incluse quelle non ancora pienamente avviate all'utilizzo di SAF[116].

Munich Airport

L'aeroporto di Monaco rappresenta un esempio significativo di intervento aeroportuale non fondato sul sussidio diretto al prezzo del SAF, ma sulla riduzione delle barriere logistiche che ne accompagnano l'utilizzo. L'aeroporto offre infatti servizi gratuiti di stoccaggio e throughput per il SAF, riducendo alcune componenti operative che possono incidere sul costo complessivo sostenuto da compagnie e fornitori[111].

Questa misura è rilevante perché il prezzo del carburante non è l'unico ostacolo alla diffusione dei SAF. Prima di essere rifornito agli aeromobili, il carburante deve essere consegnato, stoccato, tracciato, eventualmente miscelato e distribuito attraverso le infrastrutture aeroportuali.

Gli interventi adottati mirano a rendere più semplice l'integrazione del SAF nella *fuel supply chain* aeroportuale. Tale approccio è coerente con la strategia più ampia dello scalo, che punta a qualificarsi come *green mobility hub* e a raggiungere emissioni nette zero entro il 2035[117].

Swedavia

Un altro esempio è Swedavia, gestore della rete aeroportuale svedese. La società ha adottato un approccio basato sia su incentivi economici sia sull'acquisto diretto di SAF per compensare le emissioni dei propri viaggi aziendali[111]. Il programma prevede il sostegno fino al 50% del premio di prezzo del SAF rispetto al carburante tradizionale, limitatamente ai volumi eccedenti gli obblighi regolatori[118]. Questa impostazione è importante perché

---

[116] SEA S.p.A. SEA: a Milano Malpensa e Milano Linate confermati incentivi alle compagnie aeree che utilizzano i biocarburanti (SAF), 2024.

[117] Munich Airport, Strategy 2030.

[118] Swedavia: Sustainable Aviation Fuel (SAF) - Incentive Programme, 2025.

evita che il sussidio si limiti a finanziare volumi che sarebbero stati comunque acquistati per obbligo normativo. Swedavia utilizza quindi l'incentivo come strumento per stimolare una domanda addizionale, contribuendo a creare un mercato volontario oltre il livello minimo imposto dalla regolazione.

VINCI Airports

Il gestore aeroportuale internazionale VINCI Airports ha adottato un approccio diverso, basato sulla modulazione delle tariffe aeroportuali. In alcuni aeroporti del gruppo, il sistema prevede *bonus* o *malus* sulle tariffe di atterraggio in funzione delle performance ambientali degli aeromobili o degli operatori, con variazioni tariffarie che possono arrivare fino al 5%[111]. Questo meccanismo non finanzia direttamente l'acquisto di SAF, ma introduce un segnale economico coerente con la decarbonizzazione, perché le compagnie con performance ambientali migliori possono beneficiare di condizioni più favorevoli, mentre quelle meno efficienti sopportano un costo maggiore.

La strategia del gruppo si estende anche alla costruzione di future filiere di approvvigionamento. Nel 2025 VINCI Airports ha firmato una partnership con H2V e Hy2gen per studiare una catena di fornitura di e-SAF destinata, entro il 2030, agli aeroporti di Lyon-Saint Exupéry, Lyon Bron e Clermont-Ferrand Auvergne, con possibile successiva estensione ad altri aeroporti alpini gestiti dal gruppo[119].

AENA

AENA, principale gestore della rete aeroportuale spagnola, rappresenta un caso in cui l'azione aeroportuale si collega in modo diretto allo sviluppo della filiera nazionale dei carburanti sostenibili. Il gestore è impegnato, insieme al governo e agli *stakeholder* del settore, nella definizione di un sistema di bonus volto a incoraggiare l'utilizzo di SAF oltre i livelli minimi previsti dalla normativa europea[111].

Come già anticipato nel paragrafo 2.5.1, a Huelva è stata avviata la costruzione di un impianto di biocarburanti di seconda generazione, realizzato mediante una joint venture tra Moeve, ex Cepsa, e Bio-Oils. L'impianto avrà una capacità flessibile di 500.000 tonnellate annue di SAF e renewable diesel, a fronte di un investimento complessivo di 1,2 miliardi di euro[120]. Nel 2024 Moeve ha inoltre dichiarato di avere fornito oltre 18.000 metri cubi di SAF prodotto presso il La Rábida Energy Park, utilizzato da compagnie come Air Europa, Iberia, Vueling, Air Nostrum, TUI, Wizz Air ed easyJet[121].

---

[119] VINCI Airports, Strategic partnership to study and implement an e-SAF supply chain with H2V and Hy2gen.

[120] Moeve/Cepsa e Bio-Oils, Construction of the 2G biofuels plant in Huelva.

[121] Moeve, Supply of over 18,000 cubic meters of SAF in 2024.

Altri aeroporti europei e strumenti complementari di incentivo

Altri aeroporti europei hanno adottato misure più circoscritte rispetto ai grandi programmi pluriennali, ma utili a evidenziare la varietà degli strumenti attivabili per ridurre il differenziale di costo tra SAF e carburante convenzionale[111].

L'aeroporto di Bruxelles ha annunciato il proprio incentivo SAF nel dicembre 2023 e lo ha reso disponibile nel corso del 2024 per le compagnie passeggeri e cargo operanti su voli in partenza dallo scalo. Il contributo ha previsto un importo massimo di 200.000 euro per compagnia, destinato a coprire fino all'80% del costo aggiuntivo del SAF rispetto al carburante convenzionale[122]. Il programma ha inoltre fissato un tetto di 1.000 euro per tonnellata metrica di SAF miscelato e ha subordinato l'accesso al beneficio alla documentazione dell'acquisto del carburante da parte delle compagnie[123].

L'aeroporto internazionale di Düsseldorf ha introdotto il proprio incentivo SAF a partire da gennaio 2022[124]. Il meccanismo ha previsto un rimborso di 250 euro per tonnellata di SAF rifornito, entro il limite di 1.000 euro per rifornimento o partenza[125]. La disciplina tariffaria ha inoltre richiesto che la compagnia dimostrasse l'effettivo rifornimento presso lo scalo, indicando il numero e la data del volo[125].

L'aeroporto di Eindhoven ha previsto per il 2024 uno stanziamento di 500.000 euro destinato a contribuire ai costi sostenuti dalle compagnie per la miscelazione di SAF[111]. La misura si è inserita nell'obiettivo dichiarato dall'aeroporto di ridurre del 30% entro il 2030 le emissioni di CO_2 dei voli in partenza rispetto ai livelli del 2019[126]. Eindhoven ha inoltre avviato la preparazione di un obbligo di miscelazione SAF superiore al minimo europeo[126].

L'aeroporto di Stuttgart ha introdotto incentivi SAF già nel 2019[111]. Il programma ha previsto un contributo fino a 300 euro per 1.000 litri di SAF, nell'ambito di una dotazione complessiva di 500.000 euro[111]. Stuttgart ha confermato di aver promosso l'uso di SAF attraverso il proprio sistema tariffario, prevedendo una sovvenzione complessiva pari a 500.000 euro[127]. Una successiva analisi di fattibilità commissionata dallo stesso aeroporto ha rilevato che le strategie già sperimentate dallo scalo per aumentare l'utilizzo di SAF, inclusi gli incentivi alle compagnie, hanno ottenuto risultati limitati[128].

---

[122] *Brussels Airport Company. Brussels Airport encourages the use of sustainable aviation fuel (SAF) thanks to federal government support, 2023.*

[123] *Brussels Airport Company. (n.d.). SAF incentive.*

[124] *Salmi, H. M. The impact of the traffic charge incentives on Sustainable Aviation Fuel, 2023.*

[125] *Flughafen Düsseldorf GmbH. Tariff regulations for Düsseldorf Airport, 2023.*

[126] *Eindhoven Airport. (n.d.). Eindhoven Airport is going to further reduce CO_2 emissions: This is what is planned.*

[127] *Stuttgart Airport. (n.d.). Projects: Sustainable aviation fuel. Stuttgart Airport.*

[128] *NACO Netherlands Airport Consultants. Stuttgart Airport Future Fuels Feasibility Project Report, 2025.*

L'aeroporto di Oslo, gestito da Avinor, ha costituito un esempio rilevante di implementazione logistica del SAF nel sistema aeroportuale[129]. Nel gennaio 2016 lo scalo è diventato il primo grande aeroporto a offrire *bioJet fuel* su base regolare alle compagnie aeree che effettuavano rifornimento presso l'aeroporto. Il carburante è stato immesso nel sistema di rifornimento aeroportuale ed è stato reso disponibile a tutte le compagnie operanti sullo scalo. L'iniziativa ha previsto fino a 1,25 milioni di litri di *bioJet fuel* e ha coinvolto Lufthansa Group, KLM e SAS, che avevano già acquistato tale volume[129].

L'aeroporto del Lussemburgo ha seguito una traiettoria diversa, più orientata alla produzione che al sussidio diretto al consumo di SAF[111]. Nel marzo 2022 è stata annunciata l'acquisizione di una partecipazione in Norsk e-Fuel, società impegnata nello sviluppo di carburanti sintetici tramite processi Power-to-Liquid[130]. Il progetto ha previsto la produzione di e-fuel a partire da elettricità rinnovabile, acqua e CO_2 catturata dall'aria. Le informazioni più recenti pubblicate da Norsk e-Fuel indicano che il progetto Mosjøen si trova nella fase di *basic engineering*[131]. Separatamente, nel giugno 2023 Cargolux ha effettuato il primo uplift di SAF presso Luxembourg-Findel, con consegna del carburante alla fuel farm aeroportuale tramite il sistema CEPS e con il coinvolgimento di Cargolux, lux-Airport, World Fuel Services e Neste[132].

La diffusione globale del SAF negli aeroporti: *batch delivery* e *ongoing delivery*

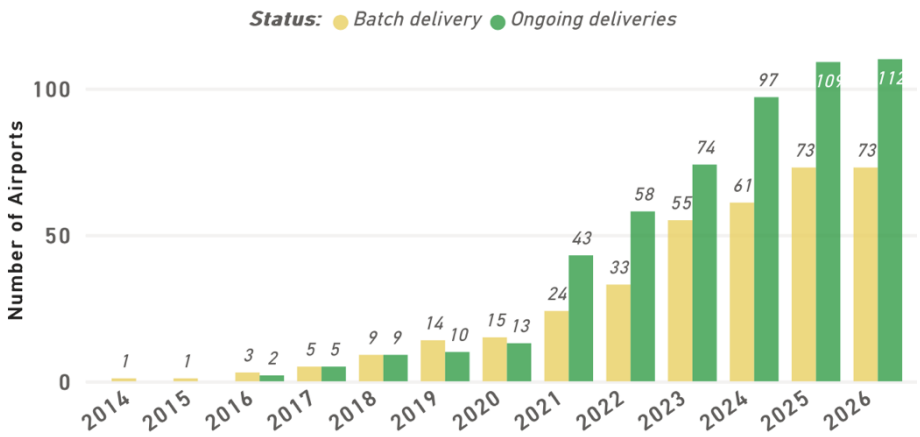


Figura 2.20: Numero di aeroporti che ricevono SAF a livello globale
Fonte: ICAO, SAF airport distribution

[129] *International Civil Aviation Organization. (n.d.). Oslo Initiative – Avinor Bioport. ICAO.*
[130] *Norsk e-Fuel. (2022, 29 marzo). Lux-Airport invests into Norsk e-Fuel. Norsk e-Fuel.*
[131] *Norsk e-Fuel. (n.d.). Projects. Retrieved, 2026.*
[132] *Cargolux. (2023, 13 giugno). Cargolux inaugurates SAF at Luxembourg airport and operates carbon neutral flight to Zhengzhou in China. Cargolux.*

A livello globale, l'ICAO ha riportato il numero di aeroporti che hanno ricevuto SAF dal 2014 al 2025 (cfr. Figura 2.20). Per quanto riguarda il 2026, i valori individuati rappresentano delle stime, aggiornate a maggio 2026.

Il grafico distingue tra gli aeroporti che adottano *batch delivery*, ossia consegne a lotti, e o*ngoing deliveries* ossia forniture continue e regolari. Fino al 2020 la crescita è risultata essere molto lenta, mentre a partire dal 2021 si è assistito ad un notevole incremento, in particolare di *ongoing deliveries*, che evidenzia un *trend* di forte espansione di SAF a livello globale.

Il ruolo dei porti nella transizione dei carburanti marittimi

Anche per il settore marittimo l'influenza dei porti è di grande rilevanza per sostenere un'efficace decarbonizzazione. Infatti, come visto nel Capitolo 1, i porti stessi sono responsabili di emissioni di CO_2 sia in modo diretto che indiretto attraverso, ad esempio, infrastrutture alimentate a diesel per la movimentazione di container o emissioni indirette prodotte da veicoli che consegnano e caricano merci nei porti. Di conseguenza, è necessario che gli scali marittimi si impegnino ad utilizzare infrastrutture e sistemi di movimentazione merci che utilizzino energia da fonti rinnovabili.

In questa ottica, a livello globale sono diversi i porti che si sono distinti per aver portato avanti investimenti nella ricerca sulla sostenibilità portuale e una rapida implementazione di tecnologie verdi. In particolare, vanno menzionati il porto americano di Long Beach, il quale ha adottato su larga scala energia elettrica da terra, il porto di Copenaghen e quello di Barcellona[133].

Ponendo l'attenzione sul contesto europeo, il 2 giugno 2025 è stato inaugurato a Copenaghen il più grande impianto di alimentazione elettrica da terra d'Europa, cofinanziato al 20% dall'Unione Europea. Il suo obiettivo è quello di fornire elettricità alle navi da crociera che attraccano ai terminal di Oceankaj e Langelinie, e ai traghetti che attraccano a Sondre Frihav, riducendo le emissioni prodotte dalle navi quando si collegano alla rete elettrica durante l'attracco in porto. È stato stimato che tale impianto può portare ad un risparmio di quasi 18.000 tonnellate di emissioni equivalenti di CO_2 all'anno[134].

Come anticipato, anche il porto di Barcellona sta portando avanti una serie di iniziative volte ad incrementare il proprio livello di sostenibilità ambientale. In particolare, dal novembre del 2024 è diventato il primo porto al mondo ad utilizzare il freddo residuo derivante dal processo di rigassificazione del gas naturale liquefatto (GNL) per usi industriali, terziari e residenziali. Tale progetto è stato sostenuto da un investimento di oltre 100 milioni di euro

[133] *Zheng Wan, Anwei Nie, Jihong Chen, Chuan Pang, Yusheng Zhou, "Transforming ports for a low-carbon future: Innovations, challenges, and opportunities", 2025.*
[134] *CINEA, Inauguration of Port of Copenhagen's new onshore power facility, 2025.*

e genera annualmente 131 GWh di energia sostenibile, equivalenti al consumo di una città con oltre 100.000 abitanti[135].

2.6.2 Ruolo delle compagnie aeree e marittime

Nel contesto della decarbonizzazione del settore dei trasporti, le compagnie aeree e marittime svolgono un ruolo chiave in quanto hanno la capacità sia di acquistare ed utilizzare carburanti sostenibili che di rinnovare le flotte con aeromobili e navi più efficienti.

Inoltre, tali operatori hanno anche la possibilità di sensibilizzare il pubblico riguardo l'impatto ambientale derivante dall'utilizzo di aerei e navi, comunicando loro le emissioni prodotte dall'utilizzo di questi mezzi di trasporto. Un esempio rilevante è rappresentato dalla compagnia aerea Air France-KLM, la quale, nel 2026, si è offerta volontaria per testare il sistema dell'Etichetta di Emissione di Volo (FEL) introdotto dall'Unione Europea per il calcolo e la visualizzazione dei valori delle emissioni dei voli[93].

Per comprendere in modo più approfondito le attività che possono implementare le compagnie aeree per portare avanti gli obiettivi di decarbonizzazione, si riporta l'esempio di Air France-KLM, la cui Climate Policy risulta essere di particolare interesse. Questa, infatti, prevede i seguenti cinque obiettivi:

- modello di business: focalizzato sulla riduzione strutturale delle rotte più brevi (es. riduzione dell'offerta sul mercato interno francese) per sostituire tali tratte con modalità di trasporto alternative. Per raggiungere questo obiettivo Air France-KLM sta stringendo delle partnership con alcuni operatori ferroviari;
- rinnovo della flotta: attraverso un investimento medio annuo di circa 3 miliardi fino al 2030, l'obiettivo è quello di sostituire la flotta con aeromobili di ultima generazione capaci di consumare fino al 25% in meno di carburante rispetto ad un aeromobile di pari dimensioni della generazione precedente;
- misure di efficienza operativa: la compagnia intende implementare programmi per la riduzione di CO_2 in tutte le divisioni, tra cui ottimizzazione delle traiettorie di volo, politica dei carburanti, eco-pilota, prestazioni degli aeromobili e riduzione del peso a bordo;
- efficienza a monte della filiera del carburante per aerei: lavorare in stretta collaborazione con i produttori di energia per migliorare l'efficienza produttiva del carburante per aerei;
- SAF: l'obiettivo è quello di sostituire progressivamente i combustibili fossili con SAF che riducono le emissioni di anidride carbonica di almeno il 65% sull'intero

[135] *World Ports Sustainability Program, Port of Barcelona – Cold that warms: How the Port Is powering the City sustainably, 2024.*

ciclo di vita (dalla produzione alla combustione) rispetto al cherosene di origine fossile[136].

Di conseguenza, risultano ampiamente rilevanti anche gli investimenti da parte delle compagnie aeree per migliorare l'efficienza tecnologica e potenziare la catena di approvvigionamento dei carburanti sostenibili.

Le stesse considerazioni sono valide anche per le compagnie marittime, le quali, secondo uno studio dell'Università Bocconi di Milano, hanno già iniziato il processo di efficientamento imposto dall'IMO utilizzando un ampio mix di tecnologie dedicate all'efficientamento energetico della nave. Ad esempio, sono state implementate modifiche dell'elica, sostituzioni dei timoni tradizionali con quelli ad alta efficienza e sostituzioni dei sistemi di lubrificazione utilizzando i più efficienti ad aria compressa. Su navi rinfusiere di grandi dimensioni, alcune compagnie hanno inserito rotori in grado di valorizzare l'energia del vento[68].

Per poter attuare queste modifiche e per adottare l'utilizzo di carburanti sostenibili sono però richiesti grandi investimenti non solo da parte delle compagnie, ma anche da parte di gestori di nuove infrastrutture per l'approvvigionamento. È quindi necessario un coordinamento tra armatori, fornitori di carburante e gestori infrastrutturali, affinché la domanda potenziale di combustibili sostenibili trovi una corrispondente disponibilità lungo la filiera.

Come esempio di evoluzione nel settore marittimo, si riporta il caso della compagnia francese Compagnie du Ponant, la quale ha presentato un progetto per la realizzazione di una innovativa nave da crociera, operativa nel 2030, caratterizzata da una motorizzazione ibrida alimentata da una combinazione di vento, idrogeno liquido e gas naturale liquefatto bio (bio-LNG). La nave utilizzerà anche pannelli fotovoltaici, una cella a combustibile a bassa temperatura, una cella a combustibile ad alta temperatura, una tecnologia di cattura del carbonio a bordo e un sistema avanzato di gestione dell'energia[68].

2.6.3 Ruolo dei *fuel suppliers*, delle bioraffinerie e dei produttori di *e-fuels*

Concludendo la valutazione dell'importanza di ciascun componente della filiera dei carburanti sostenibili, non può essere tralasciata la rilevanza delle attività dei produttori e dei fornitori. In particolare, i primi hanno la possibilità di aumentare la propria capacità produttiva e migliorare i processi di produzione, mentre i secondi possono contribuire attraverso la creazione di infrastrutture logistiche adeguate ed efficienti, sia per lo stoccaggio che per il trasporto.

---

[136] *Air France-KLM Group, CLIMATE POLICY, 2026.*

La crescita dell'offerta richiede inoltre partenariati pubblico-privato e investimenti in ricerca e sviluppo, non solo per migliorare i processi produttivi, ma anche per strutturare nuove filiere di approvvigionamento delle materie prime sostenibili. Questo aspetto è particolarmente rilevante per ridurre la dipendenza da *feedstock* limitati, favorire l'integrazione tra operatori oggi frammentati e accelerare il passaggio da progetti dimostrativi a capacità produttiva su scala industriale.

In questo contesto, le bioraffinerie rappresentano uno dei principali centri produttivi potenzialmente adatti alla produzione di SAF. Molti impianti oggi operativi sono infatti orientati alla produzione di Hydrogenated Vegetable Oil per il trasporto stradale, ma possono contribuire anche alla produzione di SAF, in particolare attraverso il pathway HEFA. Ciò contribuisce a spiegare perché, nella fase attuale, la capacità produttiva disponibile sia fortemente concentrata su questa tecnologia, pur rimanendo necessario lo sviluppo di ulteriori percorsi produttivi per sostenere la crescita della domanda nel medio-lungo periodo[137].

Un esempio di produttore impegnato in questo senso è Eni, il quale ha iniziato un percorso verso la transizione energetica nel 2014 con la bioraffineria di Gela che produce SAF. Alimentata per circa l'85% da materie prime di scarto (es. oli esausti da cucina, grassi animali e residui dell'industria agroalimentare per la produzione di biocarburanti), produce biocarburanti di qualità, quali: HVO diesel, bio-GPL, biojet e bio-nafta[138].

Nel settore marittimo, invece, un esempio rilevante è quello della società finlandese Neste, la quale produce biocarburanti e prodotti petroliferi avanzati. Infatti, Neste utilizza processi di co-produzione che integrano materie prime rinnovabili nei carburanti marittimi e che consentono una riduzione delle emissioni di gas serra fino all'80% lungo l'intero ciclo di vita del prodotto rispetto ai combustibili fossili tradizionali. I prodotti finiti che ne derivano sono: "Neste Marine™ 0.1 Co-processed" (Un carburante a basso contenuto di zolfo che include una parte rinnovabile per massimizzare la riduzione delle emissioni di CO_2), Neste Marine™ 0.1(carburanti con una concentrazione di zolfo inferiore allo 0,1% che sono ideali per la navigazione in zone protette) e Neste Marine™ 0.5 (carburante bunker di alta qualità con meno dello 0,5% di zolfo)[139].

Per quanto riguarda i produttori, bisogna soffermarsi anche su quelli che producono *e-fuel*. Questo segmento è ancora in fase di sviluppo, ma secondo i regolamenti ReFuelEU Aviation e FuelEU Maritime è destinata ad assumere una particolare rilevanza nel lungo periodo.

Per quanto riguarda l'aviazione, una delle più importanti imprese nel settore dei carburanti sintetici *Power-to-Liquid* negli Stati Uniti è, ad esempio, Twelve, che ha sviluppato una tecnologia in grado di convertire CO_2, acqua ed energia rinnovabile in carburanti sintetici certificati come SAF. L'azienda ha firmato un contratto di fornitura pluriennale con

---

[137] *IATA, Sustainable Aviation Fuel – SAF.*
[138] *Eni, "Le nostre attività a Gela".*
[139] *Neste, "Neste Marine fuels".*

International Airlines Group per 785.000 tonnellate di *e-SAF* e ha avviato la costruzione di un impianto produttivo nello Stato di Washington[140].

In Norvegia si distingue Norsk *e-Fuel*, la quale ha invece avviato un impianto pilota nel parco industriale di Herøya per la produzione di 10 milioni di litri annui di carburante tramite il processo Fischer-Tropsch e ha pianificato un secondo impianto produttivo per il 2030 in seguito al successo della fase pilota[141].

Nel settore marittimo, il ruolo dei produttori di questa tipologia di carburante è legato alla capacità di costruire filiere di approvvigionamento che coinvolgano la produzione di idrogeno verde, la cattura di CO_2 e la sintesi del carburante finale. Uno degli esempi più importanti è quello di A.P. Møller – Mærsk, il quale ha creato una rete di partnership strategiche con sei organizzazioni produttrici per garantire l'approvvigionamento di almeno 730.000 tonnellate annue di metanolo verde entro il 2025[142]. La rete si distribuisce geograficamente tra Cina, America del Nord e America del Sud, con impianti a base di bio-metanolo da scarti agricoli e impianti *power-to-X*.

La situazione generale della produzione di *e-fuel*, nonostante gli esempi positivi, presenta comunque delle problematiche strutturali. Secondo un'analisi BCG del 2025, gli annunci di nuovi impianti SAF sono diminuiti tra il 50% e il 70% dal 2022 al 2023, principalmente a causa dell'incertezza economica e dell'aumento dei costi operativi[143].

Come precedentemente detto nel paragrafo 2.5.2, solo il 4% dei progetti di combustibili a base di idrogeno ha raggiunto la decisione finale di investimento, con una quota ancora più bassa, pari a circa l'1%, che ha raggiunto lo stato operativo[18]. Tali evidenze confermano che la sola regolamentazione della domanda non è sufficiente a innescare la crescita della capacità produttiva. Risultano infatti necessari segnali di domanda stabili, strumenti per ridurre rischio finanziario e infrastrutture di certificazione, così da rendere economicamente conveniente la scalabilità produttiva.

2.7 Incentivi economici, strumenti di mercato e condizioni per la scalabilità

La transizione verso i carburanti sostenibili nel settore dell'aviazione e del marittimo non dipende solo dallo sviluppo tecnologico o dal miglioramento del quadro regolatorio, ma anche dalla struttura degli incentivi economici e dalla capacità degli strumenti di mercato di colmare il divario competitivo rispetto ai combustibili fossili tradizionali. Nel paragrafo 1.7

---

[140] *IAG, Sustainable Aviation Fuel.*

[141] *Norsk e-Fuel / Nordic Electrofuel, Pilot Plant at Herøya Industrial Park, 2024 — PMC/NCBI review su e-SAF production pathways.*

[142] *A.P. Møller – Mærsk, Maersk engages in strategic partnerships across the globe to scale green methanol production by 2025, 2022.*

[143] *BCG, Sustainable Aviation Fuels Need a Faster Takeoff, 2025.*

vi è la spiegazione del perché questo divario è dovuto non solo al prezzo finale dei combustibili, ma anche a una serie di altri fattori che incidono lungo tutta la catena del valore.

In assenza di strumenti che rispondano a queste problematiche, il mercato non è in grado di generare in maniera autonoma dei segnali di prezzo necessari a orientare le decisioni di investimento verso soluzioni a basse emissioni.

Per rispondere a questa esigenza, in entrambi i settori, c'è bisogno di una molteplicità di strumenti capaci di agire sia sulla creazione della domanda di SAF sia sulla sua regolamentazione. I due settori hanno delle differenze tra di loro e richiedono misure specifiche.

2.7.1 Settore aeronautico

Il fallimento di mercato e la logica degli incentivi

Nel settore dell'aviazione, il fallimento di mercato è dato dal divario di costo tra SAF e il *Jet fuel* fossile convenzionale, infatti, il prezzo medio di mercato dei SAF in Europa nel 2024 ha raggiunto quota 2.085 euro per tonnellata, a fronte dei 734 euro per tonnellata del *Jet fuel* convenzionale[93] (cfr. Figura 2.21).

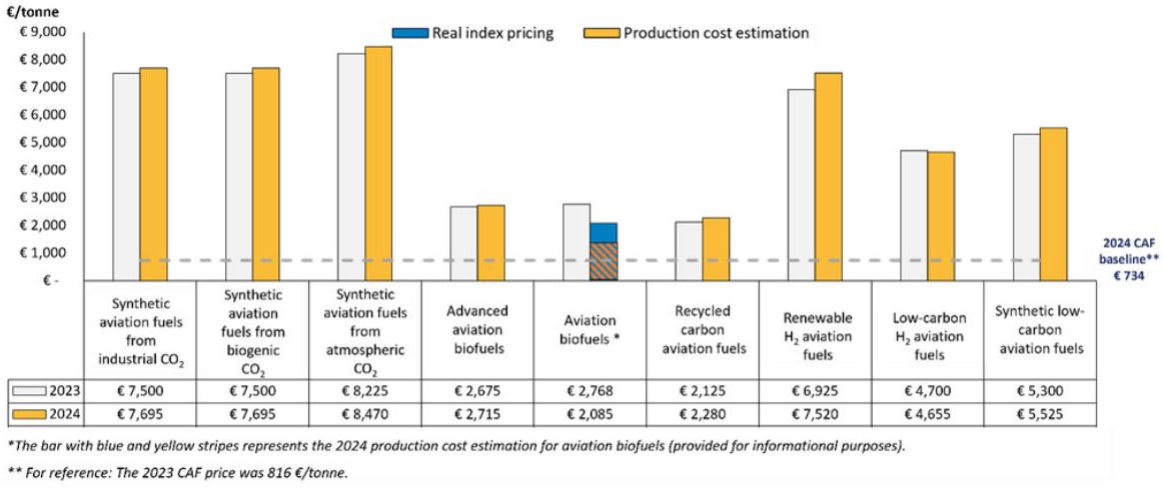


Figura 2.21: Prezzi dei combustibili sostenibili.
Fonte: EASA, Annual Technical Report on ReFuelEU Aviation – 2024 Data, 2025

Il differenziale dei due prezzi, espresso in costi di produzione, varia da un minimo di 1.461 euro per tonnellata per i biocarburanti di seconda generazione a un massimo di circa 7.695 euro per tonnellata per i carburanti *Power-to-Liquid* (*e-fuels*)[93].

La conseguenza di questo differenziale porta a un fallimento di mercato su tre livelli:

- l'esternalità negativa dei combustibili fossili: il prezzo del *Jet fuel* non comprende il costo sociale delle emissioni generate lungo il suo ciclo di vita, determinando un vantaggio competitivo artificiale rispetto ai SAF;
- l'esternalità positiva dell'innovazione: gli investimenti in nuovi *pathway* produttivi generano conoscenza che si diffonde nell'intero settore, ma il primo investitore non può appropriarsi dell'intero beneficio prodotto, con conseguente sotto-investimento;
- la struttura informativa: la frammentazione degli standard di certificazione a livello globale genera asimmetrie informative che ostacolano la formazione di un mercato trasparente[35].

Ai tre fallimenti va aggiunta la specificità del ciclo di investimento del settore. Infatti, il rinnovo della flotta aerea, che secondo le stime IATA non riprenderà prima del 2031-2034, impone il prolungamento della vita utile degli aeromobili esistenti e il ricorso a soluzioni *drop-in* compatibili con i motori in servizio. La conseguenza porta a una necessità di un sistema di incentivi che sostenga il mercato dei SAF per un lasso di tempo di almeno un decennio, necessario a coprire la fase di sviluppo industriale e l'avvio della progressiva sostituzione della flotta[31].

Carbon pricing: EU ETS e CORSIA

Il prezzo della CO_2 ha raggiunto una media annua di circa 65 euro per tonnellata nel 2024[144], con un picco superiore a 100 euro per tonnellata toccato per la prima volta nel febbraio 2023 prima di un successivo calo. Tale valore incide sulla competitività dei SAF rispetto al *Jet fuel* convenzionale, poiché aumenta il costo associato all'utilizzo dei combustibili fossili. Tuttavia, secondo le stime disponibili, per rendere competitivo l'utilizzo dei SAF anche nei percorsi produttivi meno costosi, il prezzo della CO_2 dovrebbe salire almeno a 252 dollari per tonnellata[145].

Come già evidenziato nel paragrafo 2.3.1, la progressiva eliminazione delle quote di emissioni gratuite aumenta l'esposizione economica dei vettori al costo delle emissioni[90]. In parallelo, il coordinamento con CORSIA rimane necessario per evitare sovrapposizioni tra il sistema europeo e il meccanismo internazionale di compensazione, soprattutto per i voli internazionali potenzialmente soggetti a entrambi gli strumenti.

---

[144] European Environment Agency (EEA), Use of auctioning revenues generated under the EU Emissions Trading System, EEA Indicators, 2025.

[145] BloombergNEF, Sustainable Jet fuels Need High Carbon Price to Compete, aprile 2021.

Incentivi diretti agli investimenti: Innovation Fund e IRA

Il *carbon pricing* e gli obblighi di miscelazione creano le condizioni di mercato per la transizione verso carburanti sostenibili, non riuscendo però a eliminare le barriere finanziarie che ostacolano gli investimenti nella nuova capacità produttiva.

In ambito europeo l'Innovation Fund, alimentato dai proventi delle ETS, rappresenta il principale strumento di finanziamento a fondo perduto per progetti innovativi nei settori *hard-to-abate*, inclusa la produzione di SAF. Il fondo ha assegnato, attraverso i cicli 2023-2025, oltre 4,8 miliardi di euro per 61 progetti, con una quota significativa destinata a impianti di produzione di carburanti rinnovabili di origine non biologica (RFNBO) per l'aviazione. Il ciclo di marzo 2026 ha stanziato ulteriori 2,7 miliardi di euro per 54 progetti[146].

Sul fronte della competizione internazionale per gli investimenti, l'Inflation Reduction Act statunitense del 2022 ha introdotto il SAF Tax Credit (sezione 45Z), che prevede un credito d'imposta fino a 1,75 dollari per gallone di SAF prodotto, rapportato alla riduzione delle emissioni nel ciclo di vita. Il dipartimento dell'energia americano ha erogato quasi tre miliardi di dollari in garanzie sui prestiti per la scalabilità della produzione[147], portando una sempre maggiore competizione tra giurisdizioni per l'attrazione di investimenti, che impone all'Unione Europea di sviluppare strumenti alla pari di quelli USA per mantenere la propria competitività.

Strumenti di stabilizzazione dei ricavi: Contratti per Differenza e *Carbon Contracts for Difference*

Sebbene i contributi pubblici possano ridurre il fabbisogno iniziale di capitale, uno dei principali ostacoli alla realizzazione di nuovi impianti produttivi rimane l'incertezza relativa ai ricavi futuri. La volatilità dei prezzi dell'energia, delle materie prime e dei carburanti sostenibili rende infatti difficile stimare la redditività degli investimenti nel lungo periodo e può scoraggiare l'ingresso di nuovi operatori nel mercato. Per affrontare tale problema sono stati sviluppati strumenti finalizzati a garantire una maggiore stabilità dei ricavi e a ridurre il rischio economico associato agli investimenti.

Tra i principali strumenti utilizzati a questo scopo figurano i Contratti per Differenza (Contracts for Difference, CfD). Essi prevedono la definizione di un prezzo contrattuale di riferimento (*strike price*): qualora il prezzo di mercato del carburante sostenibile risulti inferiore a tale valore, la controparte pubblica copre la differenza a favore del produttore;

---

[146] *European Commission – CINEA, Commission unlocks €2.7 billion for 54 clean industry projects under the Innovation Fund, marzo 2026.*

[147] *IEA, Aviation, Paris, 2024.*

viceversa, se il prezzo di mercato supera il prezzo contrattuale, il produttore restituisce l'eccedenza.

Nel caso dei SAF, tale strumento risulta particolarmente rilevante poiché consente di compensare il differenziale di costo rispetto al *Jet fuel* convenzionale. Alcune analisi stimano infatti un divario di prezzo tra SAF prodotti tramite tecnologia HEFA e carburante fossile compreso tra 640 e 1.800 euro per tonnellata[148]. La copertura integrale di tale differenziale nel periodo 2025-2030, finalizzata al raggiungimento degli obiettivi nazionali di impiego dei SAF, comporterebbe un costo significativo per il settore pubblico, ma consentirebbe di eliminare una delle principali barriere economiche alla diffusione di tali carburanti.

Un'applicazione particolarmente avanzata di questo approccio è rappresentata dal Revenue Certainty Mechanism (RCM), sviluppato nel Regno Unito attraverso il *Sustainable Aviation Fuel Bill*, entrato in prima lettura al Parlamento nel maggio 2025[149]. Il meccanismo prevede la stipula di contratti della durata di quindici anni tra i produttori di SAF e una società di proprietà governativa e costituisce una specifica applicazione della logica dei Contratti per Differenza al settore dei carburanti sostenibili per l'aviazione. Attraverso la definizione di un *Guaranteed Strike Price*, il sistema garantisce la stabilità dei ricavi nel lungo periodo, riducendo il rischio associato agli investimenti e facilitando l'accesso ai finanziamenti necessari per la realizzazione di nuova capacità produttiva[150] [151].

Una variante dei Contratti per Differenza è rappresentata dai Carbon Contracts for Difference (CCfD), che trasferiscono il medesimo principio di stabilizzazione dal prezzo del carburante al valore economico delle emissioni evitate. In questo caso, il meccanismo di compensazione è il medesimo a seguito della definizione di un prezzo di riferimento per la riduzione delle emissioni di carbonio generate dalla tecnologia incentivata. A differenza dei CfD tradizionali, che intervengono direttamente sul prezzo del prodotto, i CCfD agiscono quindi sull'incertezza associata all'evoluzione futura del *carbon price*, rendendo più attrattivi gli investimenti in tecnologie a basse emissioni, come SAF, e-fuels e percorsi *Power-to-Liquid*. Nel settore aeronautico, strumenti di questo tipo possono contribuire a mitigare il rischio che il maggiore costo dei carburanti sostenibili si trasferisca interamente sui vettori e sui passeggeri, con possibili effetti negativi sulla domanda e sulla competitività degli *hub* europei rispetto a quelli extra-UE.

---

[148] *Detsios, N., Theodoraki, S., Maragoudaki, L., Atsonios, K., Grammelis, P., & Orfanoudakis, N. G. (2023). Recent advances on alternative aviation fuels/pathways: A critical review.*

[149] *House of Commons Library, Sustainable Aviation Fuel Bill 2024-25, 2025.*

[150] *UK Department for Transport, SAF Revenue Certainty Mechanism: Indicative heads of terms contract allocation, 2026.*

[151] *Herbert Smith Freehills Kramer, Sustainable Aviation Fuel – UK Revenue Certainty Mechanism, 2026.*

Incentivi fiscali e strumenti di mitigazione del rischio finanziario: Superammortamento, Iperammortamento e Contributi in conto capitale e garanzie del credito

Accanto ai programmi di finanziamento diretto e agli strumenti di stabilizzazione dei ricavi, possono assumere rilievo ulteriori misure finalizzate a migliorare la redditività degli investimenti e la bancabilità dei progetti. Tra queste rientrano gli incentivi fiscali quali superammortamento e iperammortamento, che consentono di ridurre il costo effettivo degli investimenti in impianti, macchinari e tecnologie destinati alla produzione di SAF. Tali strumenti non incidono direttamente sul prezzo finale del carburante sostenibile ma, attraverso benefici fiscali che consentono di dedurre una quota maggiore del valore dei beni acquistati, aumentano la convenienza economica degli investimenti intervenendo sul lato dell'offerta.

Parallelamente, un ulteriore supporto può essere fornito attraverso contributi in conto capitale e programmi di garanzia del credito, strumenti particolarmente importanti nelle prime fasi di sviluppo del mercato dei carburanti sostenibili. I contributi in conto capitale riducono direttamente il fabbisogno iniziale di risorse finanziarie necessarie alla costruzione o all'ammodernamento degli impianti produttivi, mentre le garanzie del credito migliorano l'accesso ai finanziamenti, riducendo il rischio percepito dagli istituti finanziari e aumentando la bancabilità dei progetti.

Mercato volontario: SAF *certificates* e *offtake agreements*

In parallelo agli strumenti obbligatori, il mercato volontario dei SAF si è sviluppato attraverso meccanismi di certificazione e accordi di acquisto a lungo termine che svolgono un ruolo complementare nel sostenere gli investimenti in nuova capacità produttiva. I SAF *certificates*, noti anche come *Book-and-Claim certificates*, consentono di dividere il flusso fisico del carburante sostenibile dal trasferimento dei suoi attributi ambientali, come già illustrato nel paragrafo 1.3.1, permettendo a compagnie aeree di auto-attribuirsi riduzioni di emissioni di scope 1 o scope 3 anche in assenza di una disponibilità fisica di SAF nel proprio aeroporto di operatività.

Gli *offtake agreements* di lungo termine sono lo strumento con cui la domanda aziendale si traduce in impegni finanziari a supporto degli investimenti produttivi. A prova di questo, nel settembre 2024, Air France-KLM e TotalEnergies hanno firmato uno degli accordi di fornitura più rilevanti mai stipulati in Europa, con un impegno di fornitura fino a 1,5 milioni di tonnellate nell'arco di dieci anni, fino al 2035[152]. Nel febbraio dello stesso anno, International Airlines Group ha siglato un contratto di fornitura di quattordici anni con il

[152] *TotalEnergies / Air France-KLM, Air France-KLM ramps up its SAF offtake agreement with TotalEnergies.*

produttore americano Twelve per 785.000 tonnellate di SAF sintetico *Power-to-Liquid*, il primo accordo di questa tipologia a scala europea[153].

I dati ICAO mostrano che la prospettiva di *offtake agreements* tracciati (cfr. Figura 2.22) supera 52 miliardi di litri, con sette compagnie aeree che detengono i due terzi del volume totale impegnato e con l'85% del volume ancora basato sul processo HEFA[154], come spiegato anche nel paragrafo 2.2.1. La domanda basata su una singola tecnologia evidenzia che le politiche di incentivo dovrebbero affrontare l'argomento per rendere appetibili anche altre tecnologie, ed orientare la domanda verso i percorsi produttivi a maggiore potenziale nel lungo periodo.



Figura 2.22: Stato degli accordi di acquisto (offtake) di SAF a livello globale.
Fonte: ICAO, Global SAF Offtake Agreements Map & Database

Condizioni per la scalabilità nel settore aereo

L'analisi degli strumenti disponibili consente di identificare le condizioni per la scalabilità industriale dei SAF. La Mission Possible Partnership stima che l'allineamento di un percorso coerente con 1,5°C richieda che i SAF rappresentino il 10-15% del consumo totale di *Jet fuel* entro il 2030, con un incremento della capacità produttiva di un fattore cinque/sei volte superiore rispetto alla prospettiva attuale[155]. Il raggiungimento di questo obiettivo entro i tempi richiesti necessita di fattori che vanno oltre la sola disponibilità di incentivi.

Il primo fattore è la stabilità del quadro normativo nel lungo periodo, poiché le decisioni di investimento in impianti SAF hanno orizzonti temporali di dieci/venti anni, richiedendo che il sistema di obblighi e incentivi sia stabile. Il rapporto EASA 2025 avverte che la capacità produttiva di *e-SAF* disponibile entro il 2030 è diminuita rispetto alle previsioni dell'anno

[153] *Pan American Finance, Global SAF Report 2024 – SAF Offtake, 2025.*
[154] *ICAO, SAF Offtake Agreements Dashboard, 2025.*
[155] *Mission Possible Partnership / Energy Transitions Commission, Making Net-Zero Aviation Possible, 2022.*

precedente a causa della cancellazione o sospensione di diversi progetti[93], segnale che l'incertezza normativa e le difficoltà di accesso al capitale stanno producendo effetti negativi sulla prospettiva di investimenti.

Il secondo fattore è la diversificazione dei *feedstock*, il rapporto documenta che nel 2024 il 69% della materia prima utilizzata per la produzione di SAF proveniva da paesi terzi (cfr. Figura 2.23), con Cina (38%) e Malaysia (12%) come principali fornitori, mentre la Finlandia era il principale contributore europeo con il 10%[93].

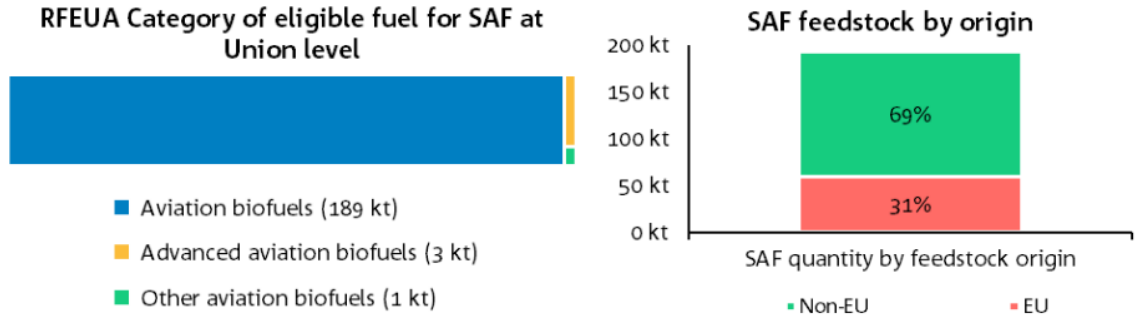


Figura 2.23: Panoramica del mercato dei carburanti sostenibili per l'aviazione (SAF) a livello UE. Fonte: EASA, European Aviation Environmental Report

La dipendenza da filiere di approvvigionamento extra-europee rappresenta un rischio sia di sicurezza degli approvvigionamenti sia di sostenibilità della tracciabilità delle materie prime, richiedendo incentivi per lo sviluppo di percorsi produttivi alternativi, in particolare ATJ-SPK da biomasse e *Power-to-Liquid*.

In questa prospettiva, gli incentivi non dovrebbero riguardare soltanto la produzione finale di SAF, ma anche le fasi upstream della filiera, in particolare la produzione, raccolta, tracciabilità e certificazione delle materie prime sostenibili. Il pathway HEFA, oggi dominante nella produzione commerciale di SAF, presenta infatti un potenziale limitato di riduzione dei costi, poiché dipende in larga misura dal prezzo e dalla disponibilità di *feedstock* come oli esausti e grassi di scarto. Intervenire sulle catene di approvvigionamento delle materie prime risulta quindi essenziale per ridurre i costi, diversificare le fonti e limitare la dipendenza da filiere concentrate o extra-europee.

Il terzo fattore è la costruzione di infrastrutture di distribuzione e certificazione adeguate. Infatti, nel 2024 venticinque fornitori di carburante hanno erogato SAF in trentatré aeroporti dell'Unione, con cinque paesi (Francia, Paesi Bassi, Spagna, Svezia e Germania) che concentrano il 99% dell'offerta totale[93]. Questa asimmetria infrastrutturale limita la concorrenza tra fornitori e mantiene i prezzi elevati, richiedendo investimenti coordinati nelle infrastrutture di stoccaggio, miscelazione e distribuzione aeroportuale per cercare di ridurla.

2.7.2 Settore marittimo

Il fallimento di mercato e la logica degli incentivi

Nel settore marittimo, il fallimento di mercato presenta caratteristiche analoghe a quelle del settore aereo, ma con specifiche strutturali che rendono la correzione attraverso gli strumenti di incentivazione più complessa. Come documenta l'UNCTAD nel Review of Maritime Transport 2025, oltre il 90% della flotta attiva in termini di tonnellaggio utilizza ancora combustibili fossili convenzionali, e solo l'8% del tonnellaggio mondiale è attrezzato per l'utilizzo di carburanti alternativi[2].

Un primo aspetto riguarda la pluralità di opzioni di combustibile disponibili. Nel marittimo coesistono bioLNG, bioLPG, HVO, FAME, metanolo, ammoniaca, idrogeno ed *e-fuels*, ciascuno con un profilo diverso a livello tecnologico, come analizzato nel Capitolo 1. La pluralità di queste tecnologie, se da un lato amplia le opzioni di decarbonizzazione, dall'altro rende più difficile la costruzione di segnali di domanda chiari e coerenti per i produttori, poiché non esiste un singolo carburante attorno al quale concentrare gli investimenti nella filiera come avviene per i SAF nell'aviazione. Il Global Maritime Forum osserva che in assenza di incentivi adeguati, gli armatori tendono a orientarsi verso i combustibili a minore costo di compliance, come LNG e biocombustibili, piuttosto che verso gli *e-fuels* a maggiore potenziale di decarbonizzazione nel lungo periodo[156].

Il secondo aspetto strutturale riguarda la separazione degli incentivi lungo la catena contrattuale. La decisione sul tipo di combustibile da utilizzare è presa da soggetti diversi da chi ne sostiene il costo. I proprietari di carico tendono a negoziare i contratti di noleggio al prezzo più basso possibile, mentre gli armatori cercano di garantire la redditività della flotta[67], generando una trappola degli incentivi che riduce la capacità del settore di assumere impegni contrattuali di lungo termine analoghi agli *offtake agreements* del settore aereo, richiedendo interventi normativi e contrattuali specifici.

***Carbon pricing*: EU ETS marittimo e IMO Net-Zero Framework**

Come già visto, nel settore marittimo l'EU ETS introduce un costo diretto associato alle emissioni di CO_2. Il prezzo medio delle quote, pari a circa 65 euro per tonnellata nel 2024[144], aumenta il costo relativo dei combustibili fossili e migliora, almeno in linea di principio, la competitività dei carburanti a minore intensità carbonica. Tuttavia, secondo gli studi di UMAS e dell'University College London, tale livello di *carbon price* non appare sufficiente a colmare il differenziale di costo tra i carburanti marittimi sostenibili e il gasolio marino convenzionale (cfr. Figura 2.24). Per questo, un *fuel* standard, anche se accompagnato da

[156] *Global Maritime Forum, IMO policy measures: Ensuring certainty for shipping's energy transition, 2025.*

meccanismi di flessibilità, difficilmente sarebbe in grado di avviare una transizione significativa verso gli *e-fuels* prima del 2040 in assenza di incentivi mirati aggiuntivi[157].

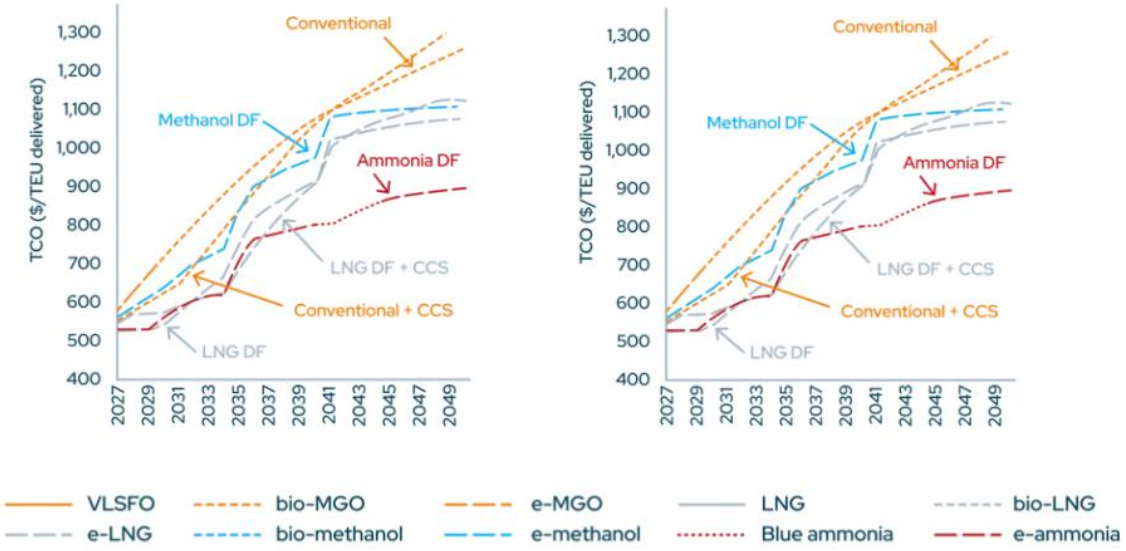


Figura 2.24: Total Cost of Ownership per diversi combustibili marittimi (scenario con e senza incentivi e-fuels). Fonte: Global Maritime Forum, IMO policy measures: Ensuring certainty for shipping's energy transition, 2025

A livello internazionale, il MEPC 83 dell'IMO, tenutosi nell'aprile 2025, ha approvato il Net-Zero Framework come nuovo Capitolo 5 dell'Annex VI di MARPOL[158]. Il *framework* combina uno standard tecnico sull'intensità di gas serra del combustibile (*GHG Fuel Intensity*) con un meccanismo economico di tipo *contribute-and-reward*, dove le navi che non raggiungono i target annuali di intensità devono effettuare contribuzioni al Net-Zero Fund IMO, mentre quelle che li superano ricevono premi in unità di conformità trasferibili.

Il *framework* è stato rinviato alla seconda sessione straordinaria del MEPC nell'ottobre 2025, dove ne è stato deciso il rinvio dell'adozione all'ottobre 2026[159] a causa di pressioni geopolitiche. Il rinvio genera incertezza dal lato degli investitori e per gli operatori che avevano pianificato le proprie strategie di compliance sulla base del calendario originale.

L'obiettivo del Net-Zero Fund non è solo sanzionatorio, i proventi sono destinati a finanziare premi per le navi che utilizzano combustibili a zero o quasi zero emissioni, a supportare programmi di formazione del personale marittimo e a facilitare la transizione equa per i

[157] *Aymer, D. & Smith, T. (UMAS / University College London), How the IMO's mid-term measures might shape shipping's energy choices and transition to e-fuels, 2025.*
[158] *IMO – Marine Environment Protection Committee – 83rd session (MEPC 83) Summary, 2025.*
[159] *Vinson & Elkins LLP, IMO Postpones Adoption of Net-Zero Framework, 2026.*

paesi in via di sviluppo. In questo senso, il *framework* IMO rappresenta il primo meccanismo globale di pricing delle emissioni applicato a qualsiasi settore industriale.

Incentivi diretti agli investimenti e Innovation Fund

Il principale strumento di incentivo diretto agli investimenti in ambito europeo è l'Innovation Fund, analogamente al settore dell'aviazione. L'inclusione del settore nel sistema EU ETS porta i proventi generati dalla restituzione delle quote da parte degli armatori, i quali sono parzialmente destinati a finanziare la transizione del settore stesso. I cicli 2023-2025 hanno finanziato impianti per la produzione di metanolo rinnovabile, ammoniaca e idrogeno per il bunkeraggio marittimo, nonché progetti di sviluppo di infrastrutture di *cold ironing* nei porti europei[134]. Ad esempio, il progetto Swap2Zero, relativo alla prima nave da crociera net-zero, ha ricevuto un contributo di 40 milioni di euro dall'Innovation Fund nel 2024[160].

La Commissione Europea e la Banca Europea degli Investimenti hanno rinnovato, nel giugno 2025, l'accordo per la Project Development Assistance, estendendo a 250 progetti l'assistenza tecnica per la preparazione delle domande di finanziamento[161].

A differenza del settore aereo, dove strumenti come il Revenue Certainty Mechanism britannico stanno emergendo come modelli di riferimento per la riduzione del rischio di prezzo per i produttori, il settore marittimo non presenta ancora meccanismi equivalenti dedicati ai combustibili marittimi sostenibili. La mancanza di tali meccanismi è particolarmente rilevante per i progetti di produzione di ammoniaca verde, e-metanolo e idrogeno per uso marittimo, che presentano profili di rischio analoghi, se non superiori, a quelli dei SAF di nuova generazione.

Corridoi verdi e *green shipping contracts*

Per superare la problematica degli incentivi separati, che caratterizza la struttura contrattuale del trasporto marittimo, sono stati sviluppati strumenti che aggregano la domanda di carburanti sostenibili e trasferiscono il segnale economico dal caricatore finale all'operatore marittimo. I *green shipping contracts*, accordi tra grandi spedizionieri e operatori marittimi che prevedono l'utilizzo di carburanti a basse emissioni con un premio di prezzo esplicitamente concordato, rappresentano il principale strumento contrattuale per questo scopo. Gli ordini di carburante per navi a carburanti alternativi nel 2025 sono stati trainati

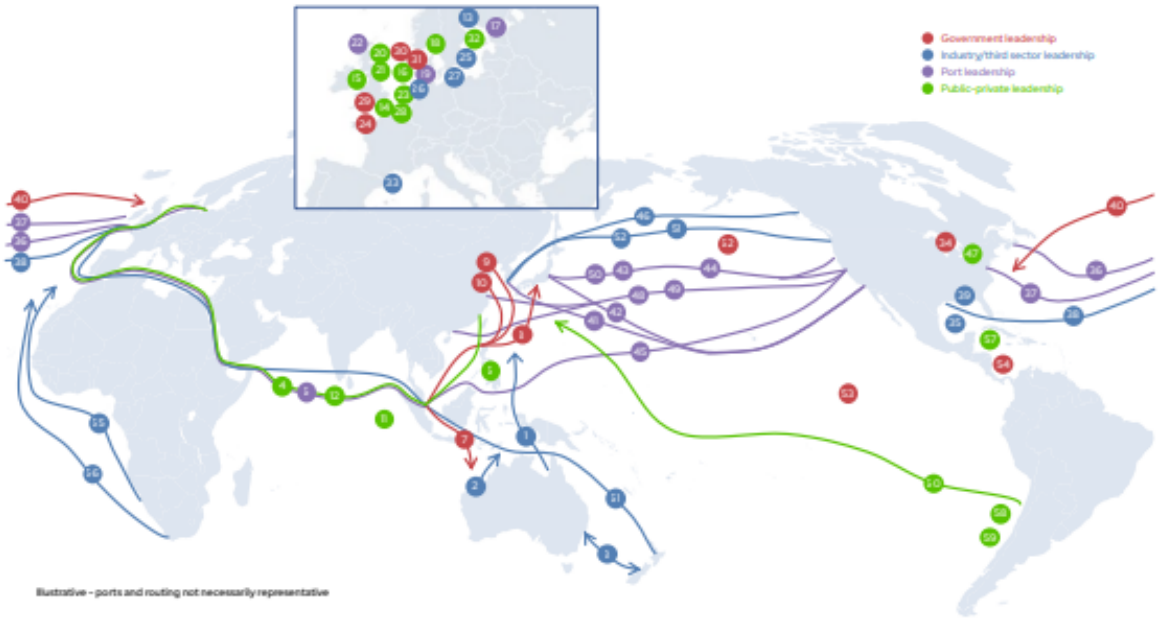
[160] *Maritime Executive, Carbon Capture, Fuel Cells, and Wind Propulsion for Net-Zero Cruise Ship, 2025.*
[161] *European Commission / EIB Advisory, European Commission and EIB to further support decarbonisation projects from the Innovation Fund, 2025.*

principalmente dai cargo owners che hanno fissato obiettivi propri di riduzione delle emissioni, nonostante il rallentamento del mercato e l'incertezza regolatoria[162].

I corridoi verdi marittimi, promossi dalla Global Maritime Forum e dalla Getting to Zero Coalition, rappresentano l'approccio più classico, le specifiche rotte commerciali vengono decarbonizzate attraverso il coordinamento tra armatori, caricatori, operatori portuali, fornitori di carburante e governi. Le iniziative globali sono cresciute del 40% nel 2023, raggiungendo 62 iniziative attive a livello mondiale (cfr. Figura 2.25), con un terzo avanzate a fasi di fattibilità o implementazione e sei iniziative frontrunner pronte per l'implementazione operativa[163].

[162] DNV, LNG-fuelled container ships sustain alternative fuel share of global orderbook amid industry slowdown, comunicato stampa, 2026.

[163] Getting to Zero Coalition / Global Maritime Forum, Annual Progress Report on Green Shipping Corridors 2024, 2024.



1. Australia Bauxite
2. Australia-East Asia Iron Ore
3. Australia-New Zealand
4. Hamburg-Shanghai
5. Philippines Corridors
6. Rotterdam-Singapore GDSC
7. Singapore-Australia GDSC
8. Singapore-Japan GDSC
9. Singapore-Shandong
10. Singapore-Tianjin GDSC
11. The Silk Alliance
12. UK-Singapore-ASEAN
13. Åland Mega Green Port
14. Dover-Calais/Dunkirk Ferry
15. Dublin-Holyhead
16. Esbjerg-Immingham
17. FIN-EST
18. Gothenburg-Frederikshavn Pilot Study
19. Gothenburg-Rotterdam
20. Larne-Liverpool
21. Liverpool – Belfast
22. Northwestern England-Ireland
23. Oslo-Rotterdam Pilot Study
24. St Helier-St Malo
25. Stockholm-Åbo
26. Sweden-Belgium
27. Trelleborg-Lübeck
28. Tyne-Ijmuiden
29. UK-Belgium
30. UK-Denmark
31. UK-Norway
32. Vaasa-Umea
33. West Mediterranean Cruise
34. Great Lakes Iron Ore
35. Gulf of Mexico Green Shipping Corridor
36. Halifax-Hamburg
37. Ireland-to-Indiana container
38. Port of Houston-Port of Antwerp-Bruges
39. US Green Bulk
40. US-UK Green Shipping Corridors Taskforce
41. Hueneme-Pyeongtaek Green Automotive
42. Hueneme-Yokohama Green Automotive
43. LA-Nagoya
44. LA-Yokohama
45. Los Angeles/Long Beach-Singapore GDSC
46. North Pacific Green Corridor Consortium
47. Pacific Northwest to Alaska Green Corridor
48. LA-Guangzhou
49. Port of Los Angeles-Port of Long Beach-Port of Shanghai
50. Port of Oakland-Yokohama
51. Seattle and Tacoma-Busan
52. Seattle and Tacoma-Korea PCTC
53. US and Pacific Blue Shipping Partnership Green Corridors
54. US and Panama Green Corridors
55. Namibia Corridors
56. South Africa-Europe Iron Ore Corridor
57. The Caribbean Green Shipping Corridor Initiative
58. Chile Piscicultura
59. Chile Sulfuric Acid
60. Chile-Japan/Korea copper concentrate
61. Taurange-Zeebrugge
62. West Green Shipping Corridor

Figura 2.25: Mappa dei corridoi verdi marittimi attivi nel 2024.
Fonte: Getting to Zero Coalition / Global Maritime Forum, Annual Progress Report on Green Shipping Corridors 2024

Lo stesso rapporto avverte che il progresso rischia di fermarsi di fronte a un *feasibility wall*, poiché la mancanza di incentivi nazionali a colmare il gap di costo dei carburanti alternativi è individuata come un grande ostacolo allo sviluppo dei corridoi[163]. Ciò conferma che il mercato volontario da solo non è sufficiente e richiede il sostegno delle politiche pubbliche.

Condizioni per la scalabilità nel settore marittimo

La scalabilità dei carburanti sostenibili nel settore marittimo presenta delle problematiche legate alla complessità della realtà marittima; per questo la decarbonizzazione in questo settore richiede il contributo coordinato di tutti gli attori[67]. Le soluzioni frammentate e le esenzioni rischiano di rendere inutile ogni risultato; perciò, è essenziale che la decarbonizzazione avvenga all'interno di un quadro normativo che si applichi a tutte le navi indipendentemente dalla bandiera.

Il primo fattore per la scalabilità è lo sviluppo coordinato delle infrastrutture di bunkeraggio; infatti, come già visto nel paragrafo 2.6, carburanti come ammoniaca, idrogeno e metanolo richiedono infrastrutture di stoccaggio e distribuzione specializzate che non possono essere costruite senza una domanda prevedibile.

La dotazione di infrastrutture di scarico della CO_2 ai principali porti mondiali e l'installazione di sistemi di *carbon capture* su un numero sufficiente di navi potrebbero produrre, rispetto agli obiettivi IMO per il 2030, un effetto equivalente all'impiego annuo di 25 Mtoe di combustibili a basse emissioni[18].

Il secondo fattore è l'adeguamento della flotta esistente. Come documentato nel paragrafo 1.6.2, la lunga vita delle navi rende fondamentale l'adeguamento tecnico attraverso il *retrofitting*, con una domanda stimata da DNV fino a 3.500 interventi annui entro il 2030[18].

Il terzo fattore è la formazione del personale marittimo. Come evidenziato nel paragrafo 1.6.2, le stime di DNV indicano una crescente necessità di formazione specialistica del personale marittimo in vista dell'adozione di combustibili alternativi, a fronte di standard di addestramento non ancora ben definiti[18].

In conclusione, la scalabilità dei carburanti sostenibili in entrambi i settori richiede la costruzione di un ecosistema industriale, normativo e finanziario coerente. Il settore del trasporto marittimo non può decarbonizzarsi da solo[67], e lo stesso vale per l'aviazione.

Il percorso verso la scalabilità implica necessariamente una visione integrata che sappia combinare l'innovazione tecnologica (analizzata nel Capitolo 1), il quadro regolatorio (analizzato nel Capitolo 2), gli incentivi economici e gli strumenti di mercato esaminati nel presente paragrafo.

Capitolo 3: Analisi empirica delle determinanti di prezzo del SAF

3.1 Dal quadro teorico-regolatorio al problema empirico del prezzo

Dopo aver esaminato il ruolo dei settori aereo e marittimo nel sistema economico globale, la loro natura hard-to-abate e le principali criticità legate alla decarbonizzazione, nonché il quadro normativo ed economico di riferimento, il Capitolo 3 si concentra sul differenziale di prezzo tra carburanti sostenibili e carburanti fossili tradizionali.

Nei capitoli precedenti è emerso come i carburanti sostenibili rappresentino un'importante soluzione per la riduzione delle emissioni nel breve e medio periodo soprattutto perché, in molti casi, possono integrarsi con infrastrutture e mezzi esistenti. Tuttavia, la loro diffusione non dipende soltanto dalla compatibilità tecnica o dalla presenza di obblighi normativi, ma anche dalla possibilità di sostenere economicamente il differenziale rispetto ai combustibili fossili convenzionali.

Dato tale contesto, il Capitolo 3 ha l'obiettivo di comprendere quali variabili, nei dati disponibili, risultino maggiormente associate all'andamento del prezzo dei Sustainable Aviation Fuels. L'obiettivo non è costruire una formula definitiva del prezzo del SAF, né ricostruire la distinta tecnica dei costi industriali di produzione, ma l'analisi mira piuttosto a verificare, con gli strumenti econometrici disponibili, quali canali di mercato risultino più rilevanti nel campione osservato.

3.1.1 Il differenziale di prezzo come barriera economica

Il differenziale nel settore aeronautico

Nel settore dell'aviazione il *Jet fuel* è un prodotto di raffinazione del greggio e, di conseguenza, il suo prezzo è influenzato da: costo del brent, costi di raffinazione e distribuzione e condizioni di domanda e offerta dei distillati medi.

Per quanto riguarda il SAF, il suo prezzo è dovuto invece a: disponibilità dei *feedstock* (che sostituiscono il ruolo del greggio), costi dei processi di conversione (HEFA, ATJ, MtJ) e costi di certificazione e tracciabilità.

Prima di analizzare il differenziale di prezzo tra i due, è bene precisare che il confronto tra prezzo del SAF e prezzo del *Jet fuel* non deve tuttavia essere interpretato come confronto tra due carburanti utilizzati sempre in modo totalmente alternativo. Ad oggi, infatti, il SAF opera prevalentemente come componente sostenibile miscelato al *Jet fuel* convenzionale e, di conseguenza, il differenziale di prezzo misura il maggior costo associato all'introduzione della quota sostenibile nella miscela finale utilizzata dagli aeromobili, piuttosto che la sostituzione integrale e immediata del carburante fossile.

Tornando all'analisi, è emerso che nel 2024 il prezzo del SAF è stato mediamente di 2.085 €/ton, contro i 734 €/ton del *Jet fuel* tradizionale, con una differenza pari a 1.351 €/ton[93]. Il dato si riferisce ai costi legati a *feedstock*, logistica upstream e produzione in raffineria, senza includere *blending*, distribuzione e margini downstream. Alla fine del 2025, le rilevazioni disponibili per il mercato europeo indicano un prezzo del SAF vicino ai 3.000$/ton, con un gap rispetto al carburante convenzionale di circa 2.000 $/ton[13]. Pur riferendosi a valute e periodi diversi, i dati confermano la persistenza di un sovrapprezzo significativo.

Le cause di questa differenza di prezzo sono dovute principalmente a cinque fattori:

- Costo dei *feedstock*: le materie prime usate nei processi SAF costano più del greggio, fattore dovuto ai maggiori costi di raccolta, pretrattamento e tracciabilità[96];
- Offerta: la capacità produttiva odierna è limitata e concentrata sul *pathway* HEFA, il quale a sua volta dipende da *feedstock* lipidici, disponibili in quantità limitate e caratterizzati da un'offerta inelastica nel breve periodo[164];
- Domanda: la domanda dei SAF è in larga parte regolata, per effetto dei mandati e degli obblighi di *blending*, e non ancora pienamente sostenuta da un mercato maturo;
- Interruzioni commerciali: le tensioni geopolitiche e la volatilità dei mercati agricoli introducono delle componenti di incertezza che ricadono sul prezzo finale;
- Ciclo di manutenzione e conversione delle bioraffinerie: tempi e costi per l'adeguamento degli impianti alla produzione di SAF pesano sul prezzo finale in modo non trascurabile.

L'andamento del prezzo del SAF e del cherosene tradizionale tra la fine del 2024 e l'inizio del 2026, riportato in Figura 3.1, denota come la differenza abbia raggiunto il maggiore scostamento tra settembre e novembre 2025, quando il prezzo del SAF HEFA-SPK ha superato stabilmente quello del cherosene tradizionale. L'aumento può essere letto nel contesto dell'entrata in vigore dei mandati SAF, tra cui ReFuelEU Aviation nell'Unione europea, e della limitata maturità del mercato, ancora caratterizzato da costi elevati e vincoli di offerta.

[164] *Judijanto, Price Dynamics of HVO in Europe, 2026.*

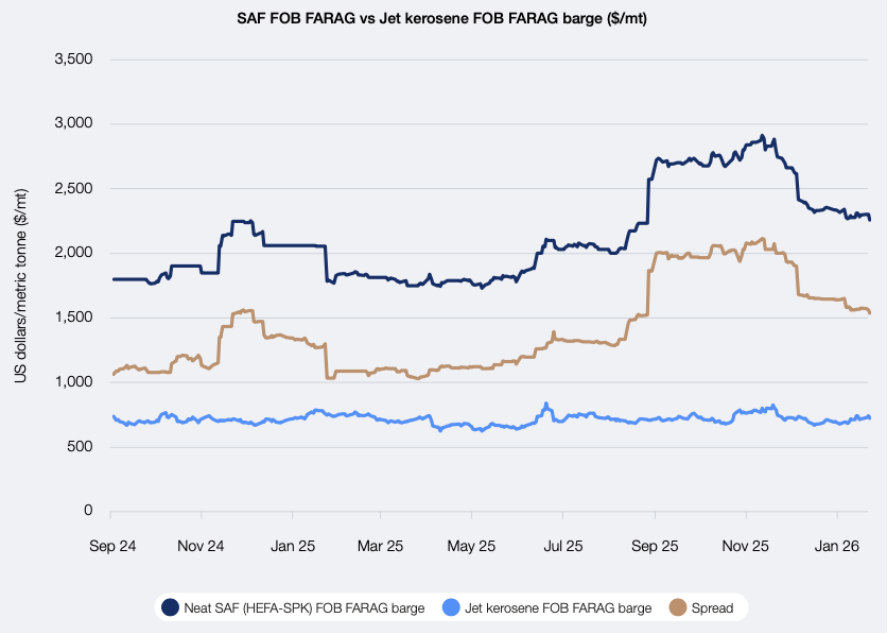


Figura 3.1: Differenza di prezzo tra SAF e cherosene per aerei tradizionali in Europa tra fine 2024 e inizio 2026.
Fonte: World Economic Forum

Il differenziale nel settore marittimo

Nel settore marittimo l'analisi della differenza dei prezzi è più complessa rispetto al settore dell'aviazione, in quanto non esiste un unico carburante di riferimento come il SAF, ma una pluralità di opzioni con un profilo di costo differente per ognuna di esse. Il *benchmark* principale è il VLSFO (Very Low Sulphur Fuel Oil), diventato standard dopo le norme IMO 2020[17], affiancato dal MGO (Marine Gas Oil) per le zone a emissioni controllate e operazioni costiere.

L'IEA ha stimato che i combustibili sostenibili per il marittimo costano in media 2,7 volte di più rispetto all'equivalente fossile nel caso di ammoniaca elettrolitica, e 3,8 volte di più per l'idrogeno elettrolitico[101]. Questi valori, tuttavia, esprimono il differenziale in termini di prezzo per unità di massa o volume, senza tenere conto delle differenze di densità energetica tra i combustibili. Un confronto economicamente più accurato richiederebbe una normalizzazione su base energetica, tipicamente in $/GJ o $/MWh.

Per esempio, una tonnellata di ammoniaca non equivale, dal punto di vista energetico, a una tonnellata di VLSFO: contiene meno energia e quindi ne servirebbe una quantità maggiore per ottenere lo stesso apporto energetico. Per questo motivo, un confronto basato solo sul prezzo per tonnellata rischia di sottostimare il reale divario di costo rispetto al combustibile fossile.

La conversione dei prezzi in dollari per barile è stata utilizzata solo per uniformare le diverse serie storiche e renderle confrontabili all'interno delle regressioni. Tuttavia, questa unità di misura non tiene conto del diverso contenuto energetico dei combustibili analizzati. Di conseguenza, i risultati delle regressioni descrivono la relazione tra prezzi espressi su base

volumetrica, ma non indicano direttamente il costo effettivo dei combustibili a parità di energia fornita.

3.1.2 Focus dell'analisi empirica sui SAF

L'analisi empirica ha considerato unicamente il settore dell'aviazione principalmente per le seguenti motivazioni:

- Piano tecnico-regolatorio: il SAF è definito da specifiche ASTM riconosciute a livello internazionale, e le sue proprietà chimico-fisiche devono rientrare in un range preciso per essere qualificato come *blending component* del *Jet fuel* tradizionale[23] [26];
- Piano economico: esiste un unico mercato di riferimento per il SAF, con un prezzo che è riconducibile a una serie storica comparabile nel tempo. Ciò non vale per il settore marittimo poiché i *low-GHG* marittimi comprendono bioLNG, HVO, FAME, metanolo, ammoniaca e idrogeno, ciascuno con caratteristiche diverse dal *feedstock* fino al prezzo finale;
- Piano della disponibilità dei dati: il dataset utilizzato per l'analisi empirica contiene una serie storica di prezzo del SAF, la quale è riferita a un prodotto specifico e collegabile ai principali *benchmark* fossili e ai *feedstock* che ne determinano il costo. Per i carburanti marittimi, non essendoci un *benchmark* come per l'aviazione, non è possibile considerare un'unica serie storica dove sono distinguibili *feedstock* e componenti del prezzo per l'analisi.

Per tali ragioni, per il settore marittimo viene comunque analizzato il price gap, ma senza l'elaborazione di conseguenti stime econometriche. Concentrarsi sul SAF consente di ottenere risultati robusti e interpretabili relativi a una variabile per cui esiste una filiera produttiva identificabile, un *benchmark* fossile diretto come il *Jet fuel* e una serie di input il cui legame con il prezzo finale è teoricamente fondato e empiricamente testabile.

3.2 Dataset, fonti e costruzione delle variabili

L'analisi empirica è stata condotta utilizzando un dataset mensile che raccoglie delle serie di prezzo relative al SAF, ai principali *benchmark* fossili, ai prodotti di raffinazione, ai *feedstock* lipidici e agli input alternativi. Le serie originarie, disponibili con frequenza settimanale o giornaliera, sono state aggregate in medie mensili in modo da rendere possibile il confronto tra variabili osservate con periodicità diverse. Successivamente, le grandezze, come detto in precedenza, sono state normalizzate in USD/barile, così da renderle confrontabili all'interno di un unico dataset.

I dati sono stati inizialmente raccolti e organizzati in file distinti, a seconda della natura delle variabili considerate, e poi inseriti in un'unica tabella di sintesi utilizzata per le analisi di correlazione e per le regressioni. Un primo gruppo di dati riguarda il *benchmark* fossile, le serie settimanali di *Jet fuel* e Dated Brent[165], insieme alla serie SAF elaborata da Airlines for America su dati Argus Media[166]. Un secondo gruppo comprende i principali *feedstock* e input alternativi, tra cui Nafta, Gas Naturale, Metanolo, Etanolo, Heating Oil[167], Palm Oil[168] e Animal Fat[169]. Un terzo gruppo riguarda le materie prime agricole, mais, frumento, zucchero e olio d'oliva, ricavate dalla banca dati DG AGRI della Commissione Europea[170] ed espresse originariamente in €/ton, poi convertite in $/bbl. I dati di queste serie sono disponibili dal 1991 per i cereali, dal 1992 per l'olio d'oliva e dal 2006 per lo zucchero. Un ultimo gruppo di dati riguarda i principali carburanti utilizzati nel settore marittimo, VLSFO, MGO e IFO, rilevati su base giornaliera per quattro porti di riferimento (Rotterdam, Singapore, Fujairah e Houston) ed espressi in $/MT[171], poi convertiti secondo lo stesso criterio delle altre serie. Questi ultimi dati, disponibili solo da maggio 2023, sono stati raccolti ma non impiegati nell'analisi empirica per le ragioni specificate nel paragrafo 3.1.2.

Il dataset generale copre dunque un arco temporale più ampio rispetto alla variabile SAF. Molte serie, come *Jet fuel*, Brent, Nafta, Metanolo, Etanolo, Palm Oil e Animal Fat, sono disponibili dal 2016, mentre il SAF è osservabile solo da novembre 2024 a maggio 2026. Di conseguenza, tutte le regressioni che hanno il SAF come variabile dipendente sono stimate su 19 osservazioni mensili.

Ai fini del confronto tra le serie, si è inoltre ricorso alla trasformazione logaritmica delle variabili. Tale scelta consente di rendere più agevole il confronto tra grandezze espresse su scale diverse e di interpretare i coefficienti delle regressioni in termini di elasticità. In una specificazione log-log, ad esempio, un coefficiente pari a 0,57 indica che un aumento dell'1% della variabile esplicativa è associato a un aumento di circa lo 0,57% del prezzo del SAF, a parità delle altre variabili incluse nel modello.

Per lo sviluppo delle regressioni, le variabili sono state inoltre riclassificate nei quattro gruppi funzionali sottoelencati, sulla base del ruolo economico e produttivo che assumono rispetto al mercato del SAF. La classificazione adottata non implica che tutti gli input considerati entrino allo stesso tempo nello stesso processo produttivo. Il SAF, infatti, può

---

[165] U.S. Energy Information Administration (EIA), Weekly Retail Gasoline and Diesel Prices / Petroleum and Other Liquids.
[166] Airlines for America (A4A) / Argus Media, SAF vs Jet fuel Price Comparison.
[167] Macrotrends.net/EIA.
[168] Tradingeconomics.com/Bursa Malaysia.
[169] U.S. Bureau of Labor Statistics/FRED.
[170] Commissione Europea – DG AGRI, agridata.ec.europa.eu.
[171] Ship & Bunker, Bunker Price Index.

essere prodotto attraverso pathways differenti. Le variabili considerate rappresentano quindi canali osservabili di mercato, coerenti con le filiere discusse nei Capitoli 1 e 2, e non una composizione fisica unica del carburante.

Variabile dipendente

La variabile dipendente dell'analisi è il prezzo del SAF. Nelle regressioni a coppie che verranno esplicitate successivamente, il SAF costituisce sempre la variabile spiegata, mentre le altre serie vengono considerate come variabili esplicative. Questa scelta è coerente con l'obiettivo dell'analisi, che consiste nello studiare l'andamento del prezzo del SAF in relazione ai principali *benchmark* energetici, *feedstock* e input di mercato potenzialmente rilevanti.

Benchmark fossili e prodotti di raffinazione

Il *benchmark* fossile diretto del SAF è il *Jet fuel*. Il suo prezzo è principalmente determinato dal Brent e dai costi di raffinazione, che si possono misurare attraverso *crack spread,* ossia il differenziale tra il prezzo del prodotto raffinato e quello del greggio di riferimento. Il Brent costituisce il principale *benchmark* internazionale del greggio e rappresenta un fattore determinante per l'andamento dei prezzi dei prodotti petroliferi. Nelle regressioni sul SAF, il Brent è il proxy del contesto energetico: pur non essendo un *feedstock* diretto del SAF, ne influenza il costo di produzione attraverso i mercati energetici e il prezzo dell'idrogeno impiegato, tra le altre, nella filiera produttiva HEFA.

La Nafta, invece, è una frazione della distillazione del greggio. La sua inclusione nel dataset consente di distinguere, almeno in parte, l'effetto riconducibile al prezzo del greggio da quello legato ai prodotti intermedi della raffinazione. In questo modo, è possibile verificare se la componente di processo e raffinazione presenti un potere esplicativo aggiuntivo rispetto al solo Brent nell'interpretazione delle dinamiche del prezzo del SAF.

Feedstock lipidici HEFA

Vi rientrano le materie prime del processo HEFA, che rappresenta la tecnologia dominante per la produzione di SAF. Tra le principali componenti si riportano:

- Palm Oil: uno dei principali *feedstock* a livello globale. È classificato come materia prima di prima generazione, con implicazioni in termini di sostenibilità e regolamentazione. In particolare, il suo utilizzo è soggetto a limitazioni, poiché i prodotti associati a rischio di deforestazione non sono considerati pienamente coerenti con gli obiettivi delle politiche europee sui carburanti sostenibili.
- Animal Fat: è il *feedstock* di seconda generazione più rilevante in Europa. I grassi animali, così come altri residui lipidici di origine industriale, sono generalmente

considerati più sostenibili rispetto agli oli vegetali di prima generazione, poiché derivano da scarti e sottoprodotti. Tuttavia, la loro disponibilità è limitata e l'offerta tende a essere poco elastica nel breve periodo, elemento che può incidere sulla formazione dei prezzi[164];

- Olio d'oliva: è considerato come un proxy debole dei *feedstock* lipidici e come variabile di controllo. Pur non rappresentando un input centrale nella produzione di SAF, la sua inclusione consente di osservare se i movimenti del mercato europeo degli oli vegetali contengano informazioni aggiuntive rispetto al Palm Oil e agli altri *feedstock* lipidici maggiormente rilevanti.

***Feedstock* intermedi alternativi non lipidici**

In questo gruppo rientrano le variabili collegate a *pathway* SAF alternativi all'HEFA, come ATJ e MtJ. Tra i componenti di questo gruppo emergono:

- Etanolo: *feedstock* diretto del *pathway* ATJ-SPK. Può essere prodotto da mais, canna da zucchero, frumento e altre biomasse zuccherine. La relazione etanolo-SAF è la più immediata tra i percorsi non lipidici;
- Metanolo: *feedstock* diretto del *pathway* MtJ. Il metanolo è principalmente prodotto da gas naturale, il che crea una catena indiretta tra gas naturale e SAF nella sua produzione;
- Mais, frumento, zucchero: sono i *feedstock* agricoli a monte della produzione di etanolo. Mais e canna da zucchero sono principalmente usati negli USA e in Brasile, mentre il frumento è più rilevante in Europa[98]. Questi tre fattori non agiscono direttamente sul prezzo del SAF, ma interferiscono in modo indiretto attraverso l'etanolo.

3.3 Metodo econometrico

L'analisi econometrica è stata articolata in due macro-fasi principali, tra loro consequenziali. La prima fase riguarda l'analisi bivariata, finalizzata a esaminare le relazioni tra il prezzo del SAF e ciascuna variabile esplicativa considerata singolarmente. La seconda fase riguarda invece l'analisi multivariata aggregata, nella quale le variabili individuate nella fase precedente vengono inserite congiuntamente in diversi modelli di regressione, al fine di verificare quali fattori mantengano un potere esplicativo autonomo nella determinazione del prezzo del SAF.

Questa distinzione è rilevante perché una variabile può mostrare una relazione forte con il SAF quando viene analizzata singolarmente, ma perdere significatività quando viene inserita in un modello più ampio insieme ad altri regressori.

Tutte le regressioni sono state stimate mediante il metodo dei minimi quadrati ordinari, OLS, utilizzando il software statistico Stata. Le variabili sono state trasformate in logaritmi

naturali, come specificato nel paragrafo 3.2, così da rendere i coefficienti interpretabili come elasticità. In questo modo, il coefficiente stimato indica la variazione percentuale attesa del prezzo del SAF associata a una variazione dell'1% della variabile esplicativa considerata.

3.3.1 Analisi bivariata: matrice di correlazione e regressioni a coppie

La prima macro-fase dell'analisi è costituita dall'analisi bivariata. Essa comprende due strumenti complementari: la matrice di correlazione e le regressioni a coppie.

La matrice di correlazione è stata costruita sui log-prezzi mensili delle variabili considerate. Essa consente di misurare la forza e la direzione della relazione lineare tra ciascuna coppia di variabili. La sua funzione è duplice: da un lato, permette di verificare se le relazioni attese sulla base della mappatura input-output trovino effettivo riscontro nei dati; dall'altro, consente di individuare le coppie di variabili fortemente correlate e di stabilire quali regressori debbano essere trattati come alternativi nella costruzione dei modelli aggregati. In particolare, *benchmark* fossili come *Jet fuel*, Brent e Nafta presentano correlazioni elevate tra loro; per questo motivo non vengono inseriti simultaneamente nella stessa regressione multivariata.

Accanto alla matrice di correlazione, sono state stimate regressioni OLS a coppie tra il log-prezzo del SAF e ciascuna variabile esplicativa. Tali regressioni consentono di stimare l'elasticità del SAF rispetto al singolo input, *benchmark* o *feedstock*, e di valutare la capacità esplicativa individuale di ciascuna variabile attraverso l'R^2, l'errore standard e l'F-test.

Per le serie storiche più estese, come *Jet fuel*, Brent, Nafta, *feedstock* energetici e agricoli disponibili dal 2016, sono state stimate anche versioni con dummy strutturali riferite a tre shock esogeni rilevanti: la pandemia da COVID-19 nel 2020, il conflitto russo-ucraino nel 2022 e il periodo post-2023, associato all'entrata in vigore di normative rilevanti per il settore, tra cui RED II e ReFuelEU Aviation. L'obiettivo di queste dummy è verificare se la relazione osservata tra due variabili sia stabile oppure influenzata da shock del periodo.

Nel caso delle regressioni aventi il SAF come variabile dipendente, le dummy strutturali di lungo periodo non sono invece applicabili, poiché la serie storica disponibile copre esclusivamente il periodo novembre 2024 – maggio 2026. Per questa ragione, nelle regressioni sul SAF sono state considerate due dummy temporali annuali, d2025 e d2026, volte a verificare l'eventuale presenza di differenze sistematiche tra anni non spiegate dai prezzi degli input. L'anno base è rappresentato dal periodo novembre-dicembre 2024, poiché coincide con l'inizio della serie storica disponibile per il SAF e costituisce quindi il primo intervallo osservabile rispetto al quale confrontare le variazioni successive.

Nel complesso, l'analisi bivariata svolge tre funzioni principali: individuare le relazioni statisticamente più forti con il SAF, verificare la coerenza empirica della mappatura teorica degli input e selezionare le variabili da includere nella fase multivariata. Le variabili che mostrano una bassa correlazione con il SAF e, al tempo stesso, un'elevata correlazione con altri regressori più rilevanti vengono escluse dai modelli aggregati, poiché non

aggiungerebbero potere esplicativo e ridurrebbero ulteriormente i gradi di libertà disponibili.

3.3.2 Analisi multivariata aggregata: specificazione dei modelli e criteri di confronto

La seconda macro-fase riguarda la stima dei modelli di regressione multivariata aggregata sul log-prezzo del SAF. A differenza dell'analisi bivariata, che considera una relazione alla volta, la regressione multivariata consente di valutare il contributo simultaneo di più variabili esplicative.

La forma generale del modello stimato è la seguente:

$$\ln(SAF_t) = \alpha + \beta_1 \ln(Benchmark_t) + \beta_2 \ln(PalmOil_t) + \beta_3 \ln(AnimalFat_t) + \beta_4 \ln(\text{Input non lipidico}_t) + \gamma_1 d2025_t + \gamma_2 d2026_t + \varepsilon_t$$

dove il *benchmark* rappresenta il riferimento fossile utilizzato nel modello, mentre l'input non lipidico è rappresentato dal metanolo o dall'etanolo a seconda della specificazione stimata. I coefficienti β sono interpretabili come elasticità condizionate, cioè come variazioni percentuali attese del prezzo del SAF associate a una variazione dell'1% del regressore, a parità delle altre variabili incluse nel modello. I parametri γ_1 e γ_2 catturano eventuali effetti temporali specifici degli anni 2025 e 2026 rispetto al periodo base novembre-dicembre 2024.

I modelli multivariati sono costruiti in modo progressivo. Si parte da una specificazione minima, nella quale il prezzo del SAF è spiegato dal solo *benchmark* fossile, e si procede poi aggiungendo i principali *feedstock* lipidici della filiera HEFA e, successivamente, input rappresentativi dei *pathway* alternativi non lipidici. Inoltre, i *benchmark* fossili vengono testati in modo alternativo, sostituendo *Jet fuel* con Brent e Nafta, al fine di verificare se la relazione tra SAF e mercato fossile dipenda da uno specifico indicatore oppure rifletta più ampiamente l'ancoraggio del SAF ai mercati energetici tradizionali.

I modelli vengono confrontati sulla base di tre criteri principali: R^2, R^2 corretto e significatività individuale dei coefficienti tramite t-test. L'R^2 misura la quota di varianza del prezzo del SAF spiegata dal modello, mentre l'R^2 corretto penalizza l'aggiunta di regressori che non contribuiscono in modo informativo alla capacità esplicativa complessiva. La significatività dei coefficienti consente invece di valutare se ciascuna variabile mantenga un effetto statisticamente distinguibile una volta controllate le altre.

Il modello preferito è quindi quello che presenta il miglior equilibrio tra capacità esplicativa, significatività statistica e coerenza teorica. Tale criterio è particolarmente importante nel presente lavoro, dato il numero limitato di osservazioni disponibili per il SAF.

3.4 Risultati dell'analisi bivariata

I risultati di questa fase permettono di distinguere tra variabili che mostrano un legame empirico forte con il SAF e variabili che, pur essendo teoricamente collegate alla filiera dei carburanti sostenibili, non presentano nel campione disponibile una relazione statisticamente rilevante. Ciò costituirà la base per la successiva costruzione dei modelli multivariati aggregati.

3.4.1 Matrice di correlazione

Per gestire la possibile multicollinearità nella fase di costruzione del modello multivariato, è stata costruita una matrice di correlazione tra le variabili di interesse.

```
. corr ln_saf ln_jetfuel ln_brent ln_naphtha ln_methanol ln_ethanol ln_palmoil ln_animalfat
(obs=19)
```

	ln_saf	ln_jet~l	ln_brent	ln_nap~a	ln_met~l	ln_eth~l	ln_pal~l	ln_ani~t
ln_saf	1.0000							
ln_jetfuel	0.8862	1.0000						
ln_brent	0.8940	0.9629	1.0000					
ln_naphtha	0.8424	0.9165	0.8917	1.0000				
ln_methanol	0.7249	0.8081	0.7792	0.9473	1.0000			
ln_ethanol	0.5667	0.7209	0.6111	0.6649	0.6057	1.0000		
ln_palmoil	0.7381	0.6923	0.7528	0.6952	0.5814	0.3997	1.0000	
ln_animalfat	0.5310	0.5884	0.5574	0.2973	0.1732	0.5886	0.4041	1.0000

Tabella 3.1: Matrice di correlazione tra i log-prezzi.

Tra i *benchmark* fossili emergono correlazioni particolarmente elevate. In particolare:

- *Jet Fuel*-Brent, con un valore di 0.963, coerente con la relazione diretta tra greggio e prodotti di raffinazione;
- Brent-Nafta, con un valore di 0.892;
- Nafta-*Jet Fuel*, con un valore di 0.916.

Questi valori indicano che *Jet fuel*, Brent e Nafta sono fortemente collineari tra loro. L'inserimento simultaneo di tali variabili nello stesso modello multivariato potrebbe generare coefficienti instabili, errori standard elevati e difficoltà interpretative. Per questo motivo, nella fase multivariata i tre *benchmark* fossili vengono utilizzati come regressori alternativi e non come regressori congiunti. La similarità dell'andamento temporale dei prezzi, riportata nella Figura 3.2, conferma visivamente la forte integrazione tra le componenti della filiera fossile.

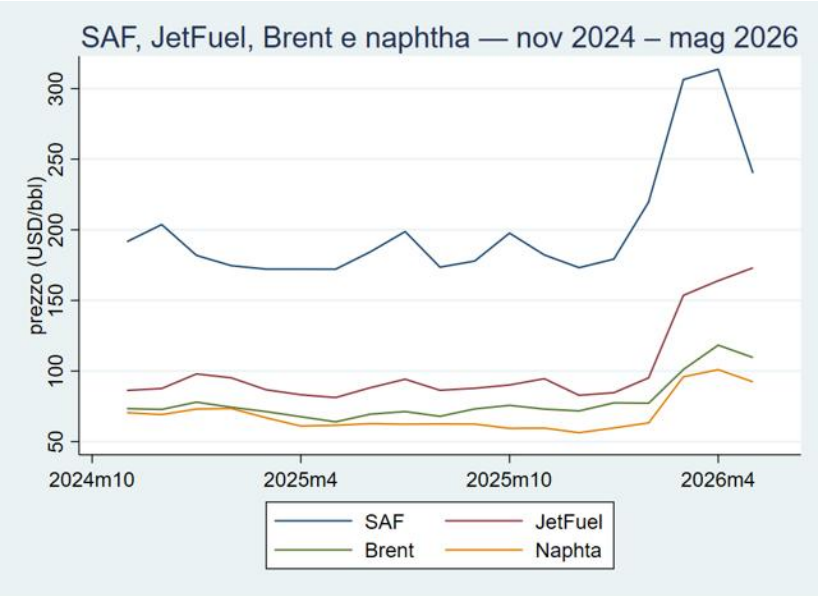


Figura 3.2: Andamento dei prezzi del SAF, Jet fuel, Brent e Nafta.

Le correlazioni che riguardano il SAF e i *benchmark* fossili sono a loro volta elevate:

- SAF-*Jet fuel*, con valore di 0.886;
- SAF-Brent, con valore di 0.894;
- SAF-Nafta, con valore di 0.842.

Questi valori suggeriscono che, nel periodo considerato, il prezzo del SAF mantiene un forte legame con il mercato dei combustibili fossili, pur non essendo un carburante prodotto da filiere petrolifere.

Tra il SAF e i *feedstock* lipidici, le correlazioni sono positive ma inferiori rispetto a quelle osservate per i *benchmar*k fossili:

- SAF-Palm Oil, con un valore di 0.738;
- SAF-Animal Fat, con un valore di 0.531.

Tali risultati confermano l'esistenza di un legame empirico con la filiera HEFA, ma suggeriscono anche che i *feedstock* lipidici spiegano una quota inferiore della variabilità del prezzo del SAF rispetto ai *benchmark* fossili.

Anche i *feedstock* non lipidici presentano correlazioni positive con il SAF:

- SAF-Metanolo, con un valore di 0.725;
- SAF-Etanolo, con un valore di 0.567

Questi valori indicano che metanolo ed etanolo sono potenzialmente rilevanti, ma il loro contributo deve essere verificato nella fase multivariata, poiché tali variabili sono a loro volta collegate ai mercati energetici e potrebbero condividere parte della varianza già spiegata dai *benchmark* fossili.

Nel complesso, la matrice di correlazione fornisce due indicazioni principali. In primo luogo, il SAF appare fortemente associato ai *benchmark* fossili, soprattutto Brent e *Jet fuel*. In secondo luogo, alcuni input produttivi, in particolare Palm Oil e Metanolo, mostrano correlazioni positive rilevanti, ma devono essere testati in modelli aggregati per verificare se il loro contributo rimanga autonomo una volta controllata la componente fossile.

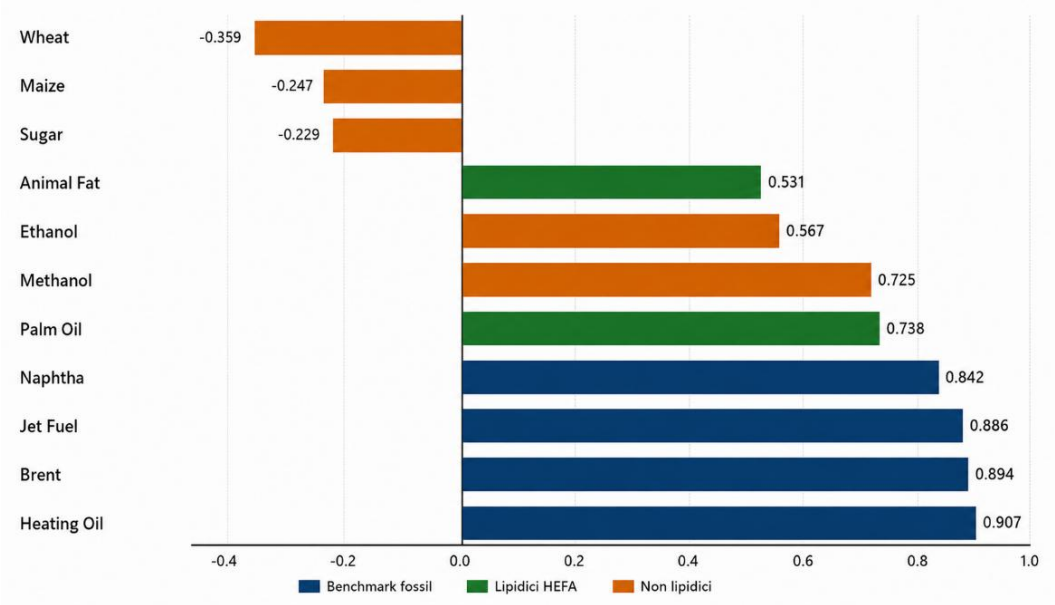


Figura 3.3: Correlazioni logaritmiche con il prezzo del SAF.

3.4.2 Regressioni a coppie

Dopo la matrice di correlazione, sono state stimate regressioni OLS a coppie tra il log-prezzo del SAF e ciascuna variabile esplicativa. Le regressioni sono state suddivise in tre blocchi: *benchmark* fossili e prodotti di raffinazione, *feedstock* lipidici della filiera HEFA e *feedstock* alternativi non lipidici.

***Benchmark* fossili e prodotti di raffinazione**

La regressione tra *Jet fuel* e SAF mostra un β pari a 0,689 nel modello senza dummy temporali e pari a 0,569 nel modello con dummy. Il coefficiente positivo e significativo indica che un aumento del prezzo del *Jet fuel* è associato a un aumento del prezzo del SAF. L'R^2 pari a 0,785 nel modello senza dummy segnala che il *Jet fuel* spiega circa il 78,5%

della varianza del log-prezzo del SAF. L'inserimento delle dummy temporali porta l'R^2 a 0,843, mentre il coefficiente del *Jet fuel* rimane positivo e significativo. Questo risultato suggerisce che la relazione tra SAF e *Jet fuel* non dipende esclusivamente da differenze temporali tra gli anni, ma riflette un legame più strutturale con il *benchmark* fossile.

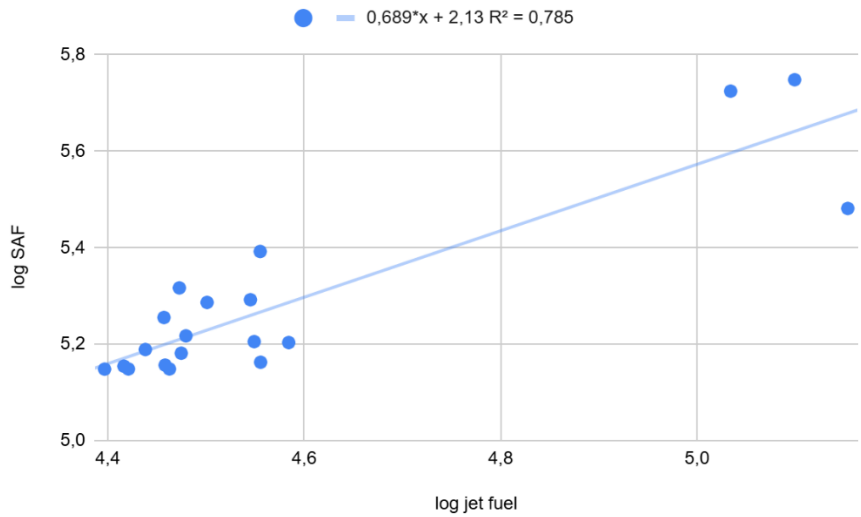


Figura 3.4: Relazione andamento prezzi SAF / Jet fuel.

Regressione senza dummy temporali	Valore stimato	Errore standard
β (*Jet fuel*)	0.689	0.087
α (Costante)	2.128	0.401
R^2	0.785	—
Errore std. residui	0.087	—
F-*statistic*	62.206	—
Gradi di libertà	17	—

Tabella 3.2: Regressione Jet fuel/SAF senza dummy temporali.

Regressione con dummy temporali	Valore stimato	Errore standard
Dummy 2026	-0.002	0.080
Dummy 2025	-0.106	0.061
β (*Jet fuel*)	0.569	0.114

α (Costante)	2.743	0.511
R^2	0.843	—
Errore std. residui	0.079	—
F-*statistic*	26.910	—
Gradi di libertà	15	—

Tabella 3.3: Regressione Jet fuel/SAF con dummy temporali.

La regressione tra Brent e SAF restituisce un β pari a 0,992 nel modello senza dummy, indicando una relazione quasi proporzionale: un aumento dell'1% del Brent è associato a un aumento di circa lo 0,992% del prezzo del SAF. Con l'inserimento delle dummy temporali, il coefficiente scende a 0,871 e l'R^2 raggiunge 0,820. Anche in questo caso, la relazione rimane positiva e rilevante, confermando il forte legame tra il prezzo del SAF e il mercato energetico fossile.

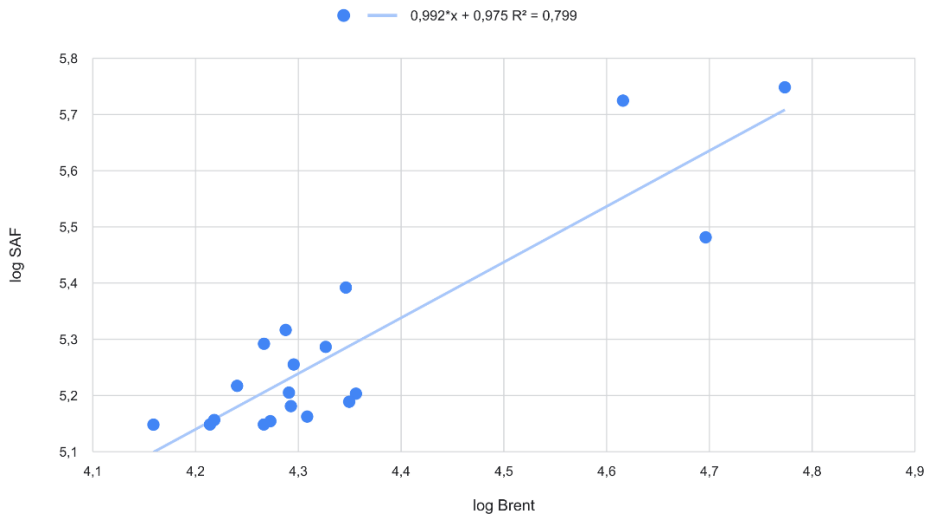


Figura 3.5: Relazione andamento prezzi SAF / Brent.

Regressione senza dummy temporali	Valore stimato	Errore standard
β (Brent)	0.992	0.121
α (Costante)	0.976	0.524
R^2	0.799	—
Errore std. residui	0.084	—

F-*statistic*	67.704	—
Gradi di libertà	17	—

Tabella 3.4: Regressione Brent/SAF senza dummy temporali

Regressione con dummy temporali	Valore stimato	Errore standard
Dummy 2026	-0.009	0.088
Dummy 2025	-0.073	0.065
β (Brent)	0.871	0.195
α (Costante)	1.548	0.841
R^2	0.820	—
Errore std. residui	0.085	—
F-*statistic*	22.800	—
Gradi di libertà	15	—

Tabella 3.5: Regressione Brent/SAF con dummy temporali.

La regressione tra Nafta e SAF evidenzia un coefficiente pari a 0,903 nel modello senza dummy, coerente con la forte correlazione osservata tra Nafta, Brent e *Jet fuel*. L'inserimento delle dummy riduce il coefficiente a 0,646 e aumenta l'R^2 da 0,709 a 0,802. Ciò suggerisce che una parte della relazione tra Nafta e SAF sia influenzata dall'andamento comune dei prezzi energetici nel periodo considerato, ma non elimina il legame positivo tra le due variabili.

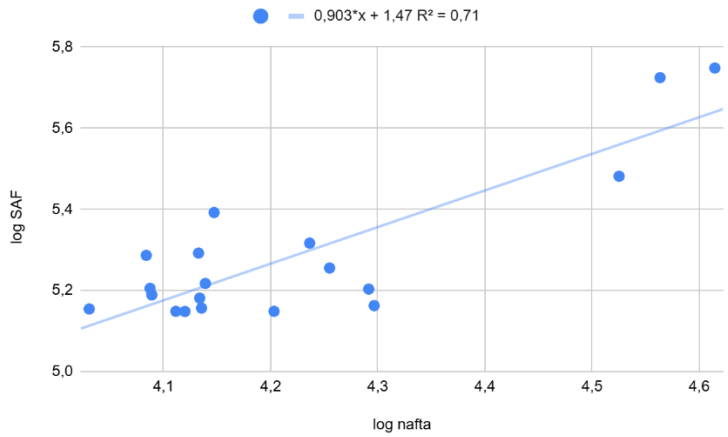


Figura 3.6: Relazione andamento prezzi SAF / Nafta

Regressione senza dummy temporali	Valore stimato	Errore standard
β (Nafta)	0.903	0.140
α (Costante)	1.474	0.592
R^2	0.709	—
Errore std. residui	0.101	—
F-*statistic*	41.540	—
Gradi di libertà	17	—

Tabella 3.6: Regressione Nafta/SAF senza dummy temporali.

Regressione con dummy temporali	Valore stimato	Errore standard
Dummy 2026	0.129	0.078
Dummy 2025	-0.030	0.070
β (Nafta)	0.646	0.158
α (Costante)	2.545	0.673
R^2	0.802	—
Errore std. residui	0.089	—
F-*statistic*	20.288	—
Gradi di libertà	15	—

Tabella 3.7: Regressione Nafta/SAF con dummy temporali.

Feedstock lipidici HEFA

La regressione tra Palm Oil e SAF conferma l'esistenza di un legame non trascurabile tra il principale *feedstock* lipidico della filiera HEFA e il prezzo del SAF. Il β stimato nel modello senza dummy è pari a 1,870, mentre l'R^2 è pari a 0,545. Il coefficiente superiore all'unità indica una relazione più che proporzionale nel campione analizzato; tuttavia, questa evidenza deve essere interpretata con cautela, poiché nella regressione bivariata non è possibile distinguere l'effetto specifico del Palm Oil da eventuali movimenti comuni con altri fattori energetici o di mercato. Con l'inserimento delle dummy temporali, il coefficiente del Palm Oil scende a 1,208 e l'R^2 aumenta a 0,694.

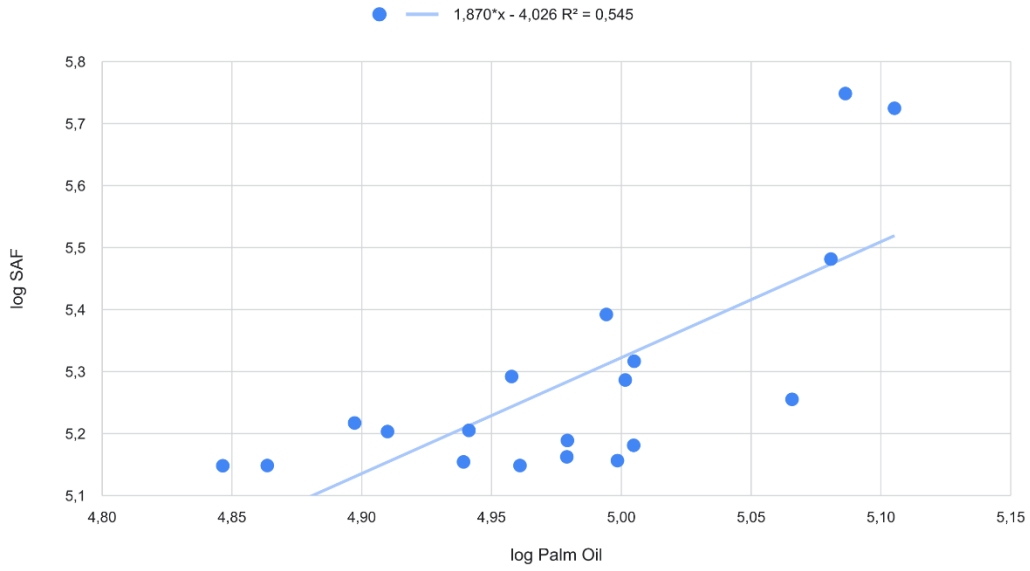


Figura 3.7: Relazione andamento prezzi SAF / Palm Oil.

Regressione senza dummy temporali	Valore stimato	Errore standard
β (Palm Oil)	1.870	0.414
α (Costante)	-4.026	2.065
R^2	0.545	—
Errore std. residui	0.227	—
F-*statistic*	20.340	—
Gradi di libertà	17	—

Tabella 3.8: Regressione Palm Oil/SAF senza dummy temporali.

Regressione con dummy temporali	Valore stimato	Errore standard
Dummy 2026	0.204	0.093
Dummy 2025	0.019	0.097
β (Palm Oil)	1.208	0.516
α (Costante)	-0.798	2.597
R^2	0.694	—
Errore std. residui	0.111	—
F-*statistic*	11.336	—
Gradi di libertà	15	—

Tabella 3.9: Regressione Palm Oil/SAF con dummy temporali.

La regressione tra Animal Fat e SAF mostra una relazione positiva ma meno intensa. Nel modello senza dummy, il coefficiente è pari a 0,787 e l'R^2 è pari a 0,282. Con l'inserimento delle dummy temporali, il coefficiente scende a 0,391, mentre l'R^2 aumenta a 0,613. Questo andamento suggerisce che la relazione tra Animal Fat e SAF sia in parte influenzata da dinamiche comuni al periodo considerato. Inoltre, la minore forza del legame può dipendere anche dalla proxy utilizzata, che cattura il mercato statunitense dei grassi animali e non necessariamente quello europeo, più rilevante per la filiera UCO e per il SAF europeo.

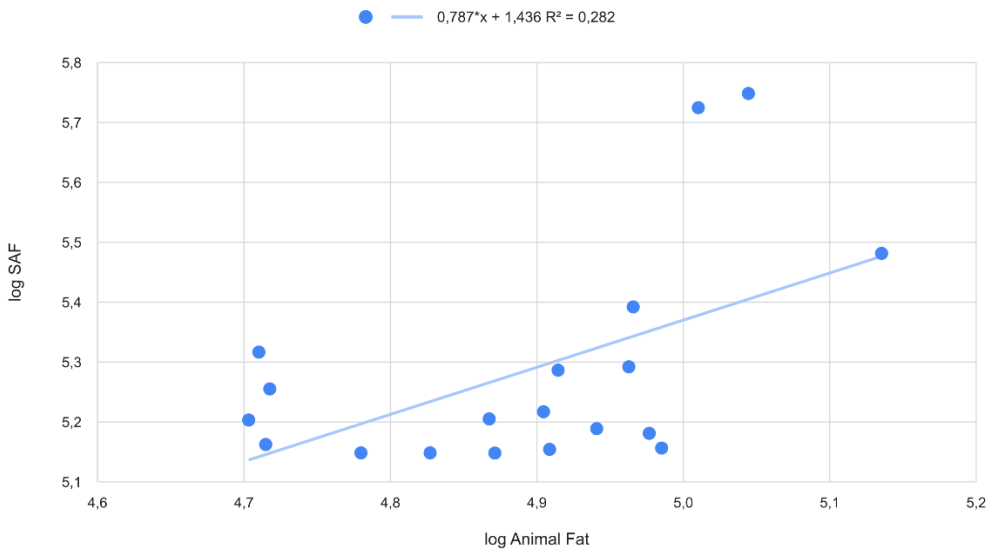


Figura 3.8: Relazione andamento prezzi SAF / Animal Fat.

Regressione senza dummy temporali	Valore stimato	Errore standard
β (Animal Fat)	0.787	0.304
α (Costante)	1.436	1.490
R^2	0.282	—
Errore std. residui	0.159	—
F-*statistic*	6.677	—
Gradi di libertà	17	—

Tabella 3.10: Regressione Animal Fat/SAF senza dummy temporali.

Regressione con dummy temporali	Valore stimato	Errore standard
Dummy 2026	0.102	0.151
Dummy 2025	-0.154	0.110
β (Animal Fat)	0.391	0.355
α (Costante)	3.444	1.678
R^2	0.613	—
Errore std. residui	0.125	—
F-*statistic*	7.922	—
Gradi di libertà	15	—

Tabella 3.11: Regressione Animal Fat/SAF con dummy temporali.

Feedstock **alternativi non lipidici**

La regressione tra Metanolo e SAF mostra un β pari a 1,058 nel modello senza dummy, indicando una relazione quasi proporzionale tra i prezzi. L'R^2 è pari a 0,525. Con l'inserimento delle dummy temporali, il coefficiente scende a 0,683 e l'R^2 aumenta a 0,744. Il risultato suggerisce che il metanolo presenta un segnale empirico rilevante, probabilmente legato alla sua connessione con i mercati energetici e gassosi. Tuttavia, anche in questo caso, la regressione bivariata non consente di stabilire se tale relazione rimanga autonoma una volta incluso il *benchmark* fossile.

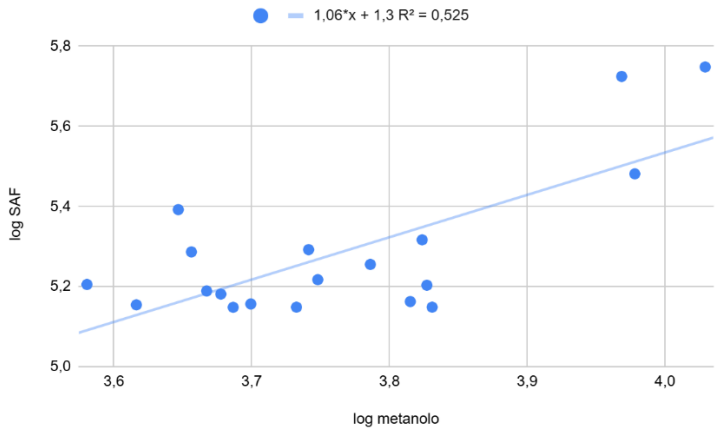


Figura 3.9: Relazione andamento prezzi SAF / Metanolo.

Regressione senza dummy temporali	Valore stimato	Errore standard
β (Metanolo)	1.058	0.244
α (Costante)	1.303	0.918
R^2	0.525	—
Errore std. residui	0.130	—
F-*statistic*	18.526	—
Gradi di libertà	17	—

Tabella 3.12: Regressione Metanolo/SAF senza dummy temporali.

Regressione con dummy temporali	Valore stimato	Errore standard
Dummy 2026	0.185	0.086
Dummy 2025	-0.034	0.080
β (Metanolo)	0.683	0.221
α (Costante)	2.689	0.846
R^2	0.744	—
Errore std. residui	0.101	—
F-*statistic*	14.525	—
Gradi di libertà	15	—

Tabella 3.13: Regressione Metanolo/SAF con dummy temporali.

La regressione tra Etanolo e SAF evidenzia un β pari a 1,470 nel modello senza dummy e pari a 1,255 nel modello con dummy. L'R^2 passa da 0,321 a 0,750 con l'inserimento delle dummy temporali. Il risultato mostra una relazione positiva, ma più instabile rispetto a quella osservata per i *benchmark* fossili e per il metanolo. L'etanolo può essere collegato al SAF attraverso il *pathway* ATJ, ma nel periodo considerato tale *pathway* rappresenta ancora una quota limitata del mercato. Per questo motivo, la relazione bivariata deve essere verificata nella fase multivariata.

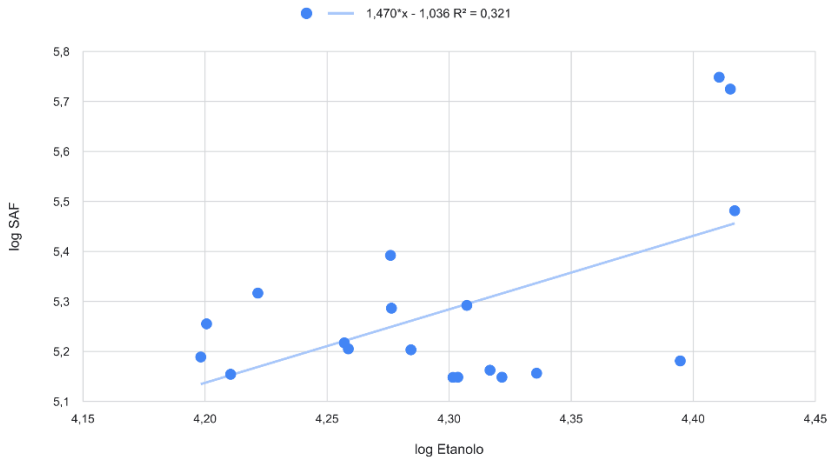


Figura 3.10: Relazione andamento prezzi SAF / Etanolo

Regressione senza dummy temporali	Valore stimato	Errore standard
β (Etanolo)	1.470	0.518
α (Costante)	-1.036	2.230
R^2	0.321	—
Errore std. residui	0.155	—
F-*statistic*	8.044	—
Gradi di libertà	17	—

Tabella 3.14: Regressione Etanolo/SAF senza dummy temporali.

Regressione con dummy temporali	Valore stimato	Errore standard
Dummy 2026	0.055	0.099
Dummy 2025	-0.202	0.084

β (Etanolo)	1.255	0.395
α (Costante)	0.001	1.667
R^2	0.750	—
Errore std. residui	0.100	—
F-*statistic*	14.990	—
Gradi di libertà	15	—

Tabella 3.15: Regressione Etanolo/SAF con dummy temporali.

Le regressioni tra SAF e variabili agricole come mais, frumento e zucchero producono invece risultati poco significativi, con correlazioni di Pearson prossime allo zero e F-test non robusti. Per questa ragione, e poiché tali variabili non rappresentano input diretti del SAF nel campione analizzato, esse non vengono incluse nei modelli multivariati.

3.4.3 Interpretazione economica dei risultati bivariati

I risultati dell'analisi bivariata delineano una gerarchia chiara tra le variabili considerate. I *benchmark* fossili presentano le relazioni più forti con il SAF, seguiti dai *feedstock* lipidici HEFA e, successivamente, dai *feedstock* alternativi non lipidici.

Questa gerarchia riflette la struttura attuale del mercato SAF. Il SAF non sembra ancora comportarsi in maniera pienamente autonoma, con dinamiche di prezzo indipendenti dai combustibili convenzionali. Al contrario, nel periodo considerato, il suo prezzo appare ancora fortemente ancorato al mercato fossile, in particolare al *Jet fuel* e al Brent. Ciò può dipendere dal fatto che il SAF viene spesso scambiato come premium rispetto al *Jet fuel* convenzionale e che i contratti di fornitura tendono a mantenere un riferimento diretto ai prezzi energetici tradizionali.

Il legame con i *feedstock* lipidici è comunque economicamente rilevante. Palm Oil e Animal Fat mostrano correlazioni positive con il SAF, coerenti con il ruolo della filiera HEFA nella produzione attuale di carburanti sostenibili. Tuttavia, la loro capacità esplicativa risulta inferiore rispetto a quella dei *benchmark* fossili. Questo non significa che tali *feedstock* siano irrilevanti nella formazione dei costi di produzione, ma che il loro effetto sul prezzo finale del SAF può essere mediato da contratti di approvvigionamento, possibilità di sostituzione tra input lipidici, differenze geografiche dei mercati e dinamiche di prezzo non direttamente osservabili nel campione.

Metanolo ed etanolo mostrano un segnale positivo e il loro legame con il SAF è economicamente plausibile, dato il ruolo dei *pathway* alternativi come MtJ e ATJ. Tuttavia, nel periodo novembre 2024 – maggio 2026, tali *pathway* risultano ancora meno centrali

rispetto alla filiera HEFA. Di conseguenza, il loro effetto sul prezzo medio del SAF può risultare attenuato o assorbito da variabili più generali, come i *benchmark* fossili.

3.5 Risultati dell'analisi multivariata aggregata

Partendo dai risultati dell'analisi bivariata, sono stati stimati diversi modelli di regressione multivariata aggregata sul log-prezzo del SAF. L'obiettivo è verificare quali variabili mantengano un effetto statisticamente ed economicamente rilevante quando vengono considerate congiuntamente.

Il passaggio dalla regressione a coppie alla regressione multivariata è fondamentale perché le relazioni bivariate possono riflettere non solo un legame diretto tra due variabili, ma anche movimenti comuni dovuti ad altri fattori. Ad esempio, una variabile può risultare correlata al SAF perché entrambe sono influenzate dal mercato energetico generale. La regressione multivariata permette quindi di verificare se tale relazione rimanga significativa una volta incluso il *benchmark* fossile o altri input produttivi.

I modelli sono costruiti in modo progressivo. Si parte da una specificazione minima con il solo *benchmark* fossile, per poi aggiungere i *feedstock* lipidici HEFA e gli input non lipidici. I *benchmark* fossili non vengono mai inseriti nello stesso modello, a causa dell'elevata multicollinearità evidenziata dalla matrice di correlazione. *Jet fuel*, Brent e Nafta vengono quindi utilizzati come regressori alternativi.

Tutti i modelli sono stimati in forma log-log, mediante OLS, con l'inclusione delle dummy temporali d2025 e d2026.

M0: modello con solo *benchmark* fossile

Il modello M0 include come unico regressore principale il *Jet fuel*, oltre alle dummy temporali. Questa specificazione ha lo scopo di misurare quanta parte della variazione del prezzo del SAF sia spiegata dal solo *benchmark* fossile.

Source	SS	df	MS	Number of obs	=	19
				F(3, 15)	=	26.91
Model	.508039411	3	.16934647	Prob > F	=	0.0000
Residual	.094397451	15	.006293163	R-squared	=	0.8433
				Adj R-squared	=	0.8120
Total	.602436862	18	.033468715	Root MSE	=	.07933

ln_saf	Coef.	Std. Err.	t	P>|t|	[95% Conf.	Interval]
ln_jetfuel	.5695924	.1138631	5.00	0.000	.326899	.8122859
d2025	-.106535	.0606408	-1.76	0.099	-.2357879	.0227179
d2026	-.0015951	.0799273	-0.02	0.984	-.1719562	.1687659
_cons	2.742629	.5114921	5.36	0.000	1.652409	3.832848

Tabella 3.16: Regressione SAF - Jet fuel.

Come riportato nella Tabella 3.16, il coefficiente del *Jet fuel* è positivo e fortemente significativo. Il modello presenta un R^2 pari a 0,843 e un R^2 corretto pari a 0,812. Ciò indica che, nel campione considerato, la specificazione composta dal *Jet fuel* e dalle dummy temporali per il 2025 e 2026 spiega una quota molto elevata della varianza del log-prezzo del SAF.

La significatività del *Jet fuel* conferma quanto già emerso nell'analisi bivariata: il prezzo del SAF risulta fortemente legato al *benchmark* fossile. La dummy 2025 appare al limite della significatività, mentre la dummy 2026 non risulta significativa. Questo suggerisce che gran parte della variazione temporale del prezzo del SAF sia già catturata dall'andamento del *Jet fuel*.

M1: modello con *benchmark* fossile e filiera lipidica HEFA

Il modello M1 aggiunge al *Jet fuel* i principali *feedstock* lipidici della filiera HEFA, ovvero Palm Oil e Animal Fat. L'obiettivo è verificare se tali variabili aggiungano potere esplicativo rispetto al modello basato esclusivamente sul *benchmark* fossile.

Source	SS	df	MS			
				Number of obs	=	19
				F(5, 13)	=	14.35
Model	.510042836	5	.102008567	Prob > F	=	0.0001
Residual	.092394026	13	.007107233	R-squared	=	0.8466
				Adj R-squared	=	0.7876
Total	.602436862	18	.033468715	Root MSE	=	.0843

ln_saf	Coef.	Std. Err.	t	P>|t|	[95% Conf.	Interval]
ln_jetfuel	.5289946	.1482221	3.57	0.003	.2087802	.849209
ln_palmoil	.1741892	.5036198	0.35	0.735	-.9138151	1.262194
ln_animalfat	.0727906	.2615755	0.28	0.785	-.4923089	.6378901
d2025	-.1005431	.0965282	-1.04	0.317	-.3090795	.1079933
d2026	-.0103526	.1163805	-0.09	0.930	-.2617773	.2410721
_cons	1.70367	2.148876	0.79	0.442	-2.938694	6.346034

Tabella 3.17: Regressione SAF - Jet fuel - Palm Oil - Animal Fat.

Come riportato nella Tabella 3.17, il *Jet fuel* rimane l'unica variabile individualmente significativa. Palm Oil e Animal Fat presentano coefficienti positivi, ma non statisticamente significativi. Il modello nel complesso rimane significativo, ma l'aggiunta dei *feedstock* lipidici non migliora la specificazione rispetto al modello M0: l'R^2 aumenta solo marginalmente, mentre l'R^2 corretto diminuisce.

Questo risultato indica che, nel campione disponibile, il contributo autonomo di Palm Oil e Animal Fat non è facilmente separabile da quello del *Jet fuel*. La componente fossile assorbe gran parte della varianza del prezzo del SAF, rendendo difficile isolare statisticamente l'effetto dei *feedstock* lipidici.

M2: modello con *benchmark* fossile, filiera HEFA ed etanolo

Il modello M2 estende M1 includendo l'etanolo, al fine di verificare se il *pathway* ATJ aggiunga potere esplicativo alla specificazione basata su *Jet fuel*, Palm Oil e Animal Fat.

Source	SS	df	MS	Number of obs	=	19
				F(6, 12)	=	11.10
Model	.510428924	6	.085071487	Prob > F	=	0.0003
Residual	.092007938	12	.007667328	R-squared	=	0.8473
				Adj R-squared	=	0.7709
Total	.602436862	18	.033468715	Root MSE	=	.08756

ln_saf	Coef.	Std. Err.	t	P>|t|	[95% Conf.	Interval]
ln_jetfuel	.5007883	.1987483	2.52	0.027	.067753	.9338237
ln_palmoil	.1547462	.5302151	0.29	0.775	-1.000493	1.309986
ln_animalfat	.0600878	.2775217	0.22	0.832	-.54458	.6647556
ln_ethanol	.1225327	.5460482	0.22	0.826	-1.067204	1.312269
d2025	-.1103489	.1093686	-1.01	0.333	-.3486427	.1279449
d2026	-.0113804	.120966	-0.09	0.927	-.2749428	.2521819
_cons	1.471394	2.460287	0.60	0.561	-3.889111	6.831898

Tabella 3.18: Regressione SAF - Jet fuel - Palm Oil - Animal Fat - Etanolo.

Come riportato nella Tabella 3.18, il coefficiente dell'etanolo non risulta statisticamente significativo. Anche i *feedstock* lipidici continuano a non mostrare un contributo autonomo robusto, mentre il *Jet fuel* rimane significativo. L'R^2 corretto diminuisce rispetto ai modelli precedenti, segnalando che l'aggiunta dell'etanolo non migliora la capacità esplicativa del modello in modo proporzionato al numero di regressori inseriti.

Il risultato è coerente con la struttura del mercato SAF nel periodo analizzato. Il *pathway* ATJ può avere rilevanza tecnologica e prospettica, ma la sua quota nel mix produttivo appare ancora insufficiente per generare un segnale di prezzo chiaramente distinguibile nel modello aggregato.

M3: modello con Brent come *benchmark* fossile

Il modello M3 sostituisce il *Jet fuel* con il Brent, mantenendo Palm Oil e Animal Fat come *feedstock* lipidici. L'obiettivo è verificare se la centralità della componente fossile dipenda specificamente dal *Jet fuel* o se emerga anche utilizzando un diverso *benchmark* energetico.

Source	SS	df	MS	Number of obs	=	19
				F(5, 13)	=	12.49
Model	.498630547	5	.099726109	Prob > F	=	0.0001
Residual	.103806315	13	.007985101	R-squared	=	0.8277
				Adj R-squared	=	0.7614
Total	.602436862	18	.033468715	Root MSE	=	.08936

ln_saf	Coef.	Std. Err.	t	P>|t|	[95% Conf.	Interval]
ln_brent	.8338566	.2649132	3.15	0.008	.2615465	1.406167
ln_palmoil	.0264809	.5721977	0.05	0.964	-1.209677	1.262639
ln_animalfat	.1908004	.277866	0.69	0.504	-.4094926	.7910935
d2025	-.1009806	.1029083	-0.98	0.344	-.3233004	.1213392
d2026	-.0581721	.1326377	-0.44	0.668	-.3447184	.2283742
_cons	.6745565	2.197653	0.31	0.764	-4.073183	5.422296

Tabella 3.19: Regressione SAF - Brent - Palm Oil - Animal Fat.

Come riportato nella Tabella 3.19, il Brent risulta positivo e statisticamente significativo anche in presenza dei *feedstock* lipidici. Palm Oil e Animal Fat non risultano invece significativi. Il modello presenta un R^2 corretto inferiore rispetto a quello ottenuto con *Jet fuel*, ma conferma comunque la forte relazione tra SAF e mercato fossile.

Il confronto tra M1 e M3 suggerisce che il *Jet fuel* rappresenti un *benchmark* leggermente più adatto rispetto al Brent per spiegare il prezzo del SAF. Ciò è coerente con il fatto che il SAF viene utilizzato come sostituto o complemento diretto del carburante avio convenzionale, più che come derivato generico del greggio.

M4: modello con Nafta come *benchmark* fossile

Il modello M4 utilizza la Nafta come *benchmark* fossile alternativo, insieme a Palm Oil e Animal Fat. Anche in questo caso, l'obiettivo è verificare la robustezza del legame tra SAF e mercato fossile.

Source	SS	df	MS	Number of obs	=	19
				F(5, 13)	=	13.63
Model	.505899049	5	.10117981	Prob > F	=	0.0001
Residual	.096537813	13	.007425986	R-squared	=	0.8398
				Adj R-squared	=	0.7781
Total	.602436862	18	.033468715	Root MSE	=	.08617

ln_saf	Coef.	Std. Err.	t	P>|t|	[95% Conf.	Interval]
ln_naphtha	.6234813	.1828043	3.41	0.005	.2285566	1.018406
ln_palmoil	.1559464	.5212043	0.30	0.770	-.970047	1.28194
ln_animalfat	.3833775	.2780907	1.38	0.191	-.2174009	.9841559
d2025	-.0770157	.0971425	-0.79	0.442	-.2868792	.1328478
d2026	.0132588	.1166085	0.11	0.911	-.2386585	.2651761
cons	.0463225	2.079829	0.02	0.983	-4.446876	4.539521

Tabella 3.20: Regressione SAF - Nafta - Palm Oil - Animal Fat.

Come riportato nella Tabella 3.20, il coefficiente della Nafta risulta positivo e significativo. Palm Oil non è significativo, mentre Animal Fat presenta un p-*value* più basso rispetto ad altri modelli, pur senza raggiungere una significatività pienamente robusta. Il risultato conferma che la relazione tra SAF e componente fossile non dipende esclusivamente dal *Jet fuel*, ma riflette più in generale l'ancoraggio del SAF ai mercati energetici tradizionali.

Tuttavia, anche in questo caso, il modello non mostra un miglioramento sostanziale rispetto alla specificazione con *Jet fuel*. La Nafta può catturare alcune dinamiche di raffinazione, ma il *Jet fuel* resta il *benchmark* economicamente più diretto per interpretare il prezzo del SAF.

M5: modello con soli input produttivi e metanolo

Il modello M5 esclude il *benchmark* fossile e include Palm Oil, Animal Fat e Metanolo. Questa specificazione permette di verificare cosa accade quando la componente fossile viene rimossa dal modello.

Source	SS	df	MS		
Model	.48194231	5	.096388462	Number of obs	= 19
Residual	.120494552	13	.009268812	F(5, 13)	= 10.40
				Prob > F	= 0.0003
Total	.602436862	18	.033468715	R-squared	= 0.8000
				Adj R-squared	= 0.7231
				Root MSE	= .09627

ln_saf	Coef.	Std. Err.	t	P>|t|	[95% Conf.	Interval]
ln_palmoil	.5304595	.539039	0.98	0.343	-.6340633	1.694982
ln_animalfat	.3143194	.3077183	1.02	0.326	-.3504655	.9791042
ln_methanol	.605946	.2334868	2.60	0.022	.1015285	1.110364
d2025	-.0398329	.1068104	-0.37	0.715	-.2705827	.190917
d2026	.0857124	.124084	0.69	0.502	-.1823548	.3537795
cons	-1.172431	2.30062	-0.51	0.619	-6.142619	3.797757

Tabella 3.21: Regressione SAF - Palm Oil - Animal Fat - Metanolo.

Come riportato nella Tabella 3.21, il metanolo diventa la variabile più significativa del modello. Questo risultato è particolarmente rilevante perché mostra che il metanolo trasmette effettivamente un segnale di prezzo, ma tale segnale tende a essere assorbito dalla presenza del *benchmark* fossile nei modelli completi.

L'interpretazione corretta non è quindi che il *pathway* MtJ sia irrilevante, ma che il suo contributo sia difficilmente distinguibile quando nel modello viene incluso un regressore fortemente dominante come il *Jet fuel*. In assenza della componente fossile, il metanolo emerge come variabile esplicativa più rilevante.

M6: modello con soli input produttivi ed etanolo

Il modello M6 è analogo a M5, ma sostituisce il metanolo con l'etanolo. Anche questa specificazione esclude il *benchmark* fossile, consentendo di osservare il comportamento degli input produttivi senza la variabile dominante rappresentata dal mercato fossile.

Source	SS	df	MS	Number of obs	=	19
				F(5, 13)	=	8.53
Model	.461749469	5	.092349894	Prob > F	=	0.0009
Residual	.140687393	13	.010822107	R-squared	=	0.7665
				Adj R-squared	=	0.6767
Total	.602436862	18	.033468715	Root MSE	=	.10403

ln_saf	Coef.	Std. Err.	t	P>|t|	[95% Conf.	Interval]
ln_palmoil	.5608929	.600107	0.93	0.367	-.7355596	1.857345
ln_animalfat	-.0039866	.328322	-0.01	0.990	-.7132831	.7053099
ln_ethanol	.9927008	.5025117	1.98	0.070	-.0929098	2.078311
d2025	-.1264126	.1297142	-0.97	0.348	-.4066432	.1538179
d2026	.083356	.1365953	0.61	0.552	-.2117402	.3784523
cons	-1.699995	2.511494	-0.68	0.510	-7.125747	3.725758

Tabella 3.22: Regressione SAF - Palm Oil - Animal Fat - Etanolo.

Come riportato nella Tabella 3.22, l'etanolo assume maggiore rilevanza rispetto ai modelli completi, anche se la sua significatività è meno robusta rispetto a quella osservata per il metanolo in M5. Questo risultato suggerisce che anche l'etanolo possa trasmettere un segnale di prezzo, ma tale segnale rimane più debole e instabile.

Il risultato è coerente con la posizione ancora marginale del *pathway* ATJ nel periodo considerato. L'etanolo può essere rilevante dal punto di vista tecnologico e prospettico, ma non appare ancora in grado di spiegare in modo robusto il prezzo aggregato del SAF quando vengono considerate le specificazioni più complete.

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
VARIABLES	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6
ln_jetfuel	0.570***	0.529***	0.501**				
	(0.114)	(0.148)	(0.199)				
ln_palmoil		0.174	0.155	0.0265	0.156	0.530	0.561
		(0.504)	(0.530)	(0.572)	(0.521)	(0.539)	(0.600)
ln_animalfat		0.0728	0.0601	0.191	0.383	0.314	-0.00399
		(0.262)	(0.278)	(0.278)	(0.278)	(0.308)	(0.328)
ln_ethanol			0.123				0.993*
			(0.546)				(0.503)
d2025	-0.107*	-0.101	-0.110	-0.101	-0.0770	-0.0398	-0.126
	(0.0606)	(0.0965)	(0.109)	(0.103)	(0.0971)	(0.107)	(0.130)
d2026	-0.00160	-0.0104	-0.0114	-0.0582	0.0133	0.0857	0.0834
	(0.0799)	(0.116)	(0.121)	(0.133)	(0.117)	(0.124)	(0.137)
ln_brent				0.834***			
				(0.265)			
ln_naphtha					0.623***		
					(0.183)		
ln_methanol						0.606**	
						(0.233)	
Constant	2.743***	1.704	1.471	0.675	0.0463	-1.172	-1.700
	(0.511)	(2.149)	(2.460)	(2.198)	(2.080)	(2.301)	(2.511)
Observations	19	19	19	19	19	19	19
R-squared	0.843	0.847	0.847	0.828	0.840	0.800	0.766

Standard errors in parentheses
*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

Tabella 3.23: Sintesi delle regressioni multivariate M0-M6.

3.5.1 Confronto tra i modelli multivariati

Il confronto tra i modelli M0-M6 mostra che la specificazione con il solo *Jet fuel* (e dummy temporali) presenta il miglior equilibrio tra capacità esplicativa e parsimonia. M0 ottiene un R^2 pari a 0,843 e un R^2 corretto pari a 0,812. L'aggiunta dei *feedstock* lipidici e degli input non lipidici non produce un miglioramento dell'R^2 corretto; al contrario, l'indicatore tende a diminuire, segnalando che i regressori aggiuntivi non aumentano la capacità esplicativa in misura sufficiente rispetto alla perdita di gradi di libertà.

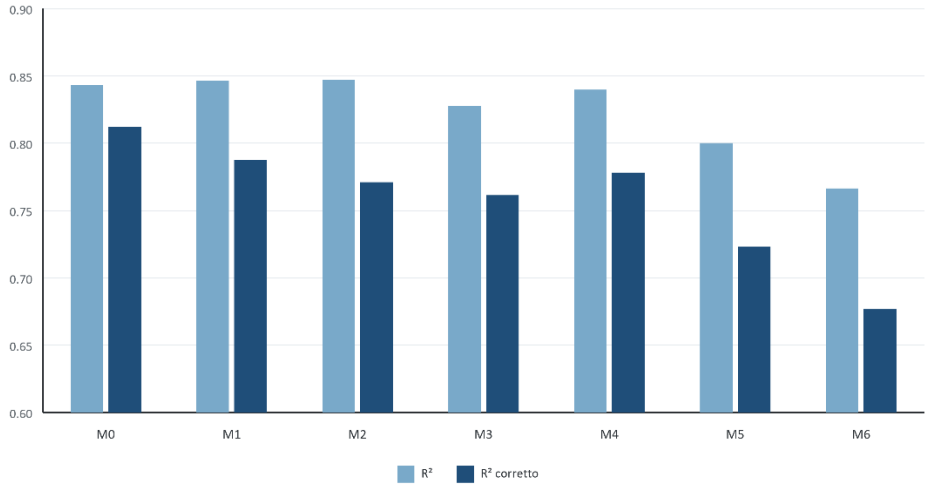


Figura 3.11: Confronto tra R^2 e R^2 corretto dei modelli multivariati.

I modelli M1 e M2 confermano che, una volta incluso il *Jet fuel*, Palm Oil, Animal Fat ed Etanolo non mantengono un contributo statisticamente autonomo. I modelli M3 e M4 confermano invece che la centralità della componente fossile rimane valida anche sostituendo il *Jet fuel* con Brent o Nafta. Tuttavia, il *Jet fuel* rimane il *benchmark* più coerente sia dal punto di vista statistico sia dal punto di vista economico.

I modelli M5 e M6, che escludono il *benchmark* fossile, offrono un'indicazione complementare. In assenza del *Jet fuel*, metanolo ed etanolo acquistano maggiore rilevanza, suggerendo che i *pathway* alternativi trasmettano un segnale di prezzo. Tuttavia, tale segnale viene in larga parte assorbito quando il *benchmark* fossile viene reintrodotto nella regressione.

3.5.2 Interpretazione economica dei risultati multivariati

Pur essendo un carburante sostenibile e non un prodotto diretto della raffinazione petrolifera, il SAF appare ancora fortemente ancorato al mercato energetico tradizionale.

Come già specificato, questo risultato è coerente con la struttura attuale del mercato. Il SAF viene spesso scambiato come premium rispetto al *Jet fuel* convenzionale, e i contratti di fornitura tendono a mantenere un riferimento diretto al prezzo del carburante fossile. Di conseguenza, le variazioni del mercato energetico tradizionale si trasmettono al SAF sia attraverso il *benchmark* commerciale del *Jet fuel*, sia attraverso i costi energetici dei processi produttivi.

L'analisi dell'andamento dei prezzi indicizzati consente di interpretare meglio questo risultato.

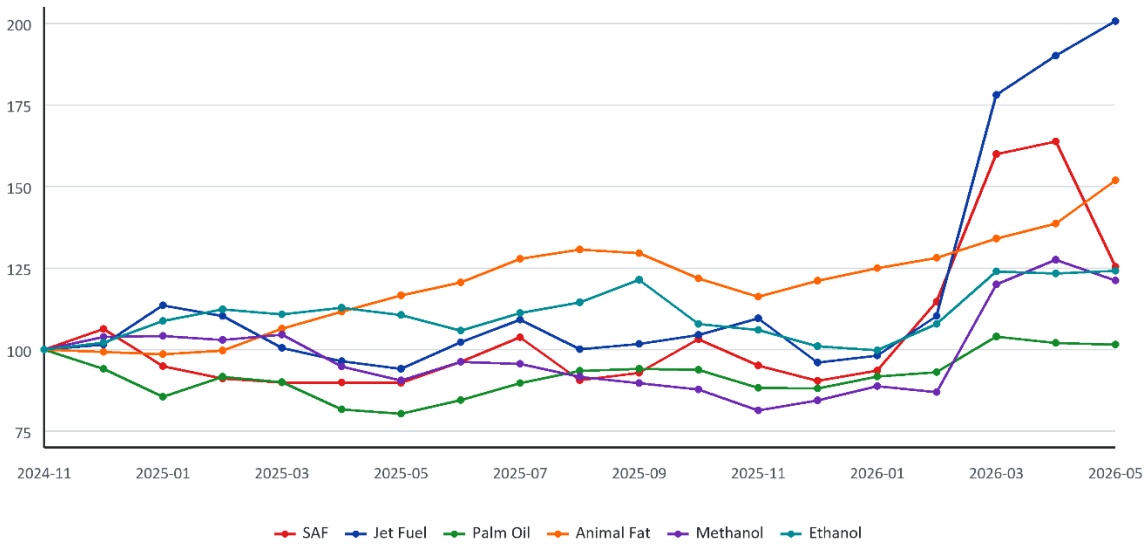


Figura 3.12: Andamento indicizzato dei prezzi delle principali variabili (novembre 2024 = 100).

Nel primo intervallo, novembre 2024 – gennaio 2025, il SAF registra una flessione mentre il *Jet fuel* aumenta e il Palm Oil diminuisce. Questo disallineamento suggerisce che il prezzo del SAF non segua meccanicamente un unico *driver*, ma possa essere influenzato anche da condizioni specifiche di offerta, disponibilità di prodotto e dinamiche di premio rispetto al fossile.

Nel secondo intervallo, maggio 2025 – luglio 2025, SAF, *Jet fuel*, Palm Oil e Animal Fat si muovono nella stessa direzione. Questo co-movimento spiega perché, nella regressione multivariata, sia difficile separare il contributo dei *feedstock* lipidici da quello del *Jet fuel*. Quando più variabili si muovono simultaneamente, il modello tende ad attribuire il potere esplicativo alla variabile più stabile e statisticamente dominante.

Nel terzo intervallo, agosto 2025 – ottobre 2025, il SAF aumenta più del *Jet fuel*, mentre l'Animal Fat diminuisce. Questo episodio suggerisce la presenza di dinamiche specifiche del mercato SAF, potenzialmente legate all'avvicinarsi delle scadenze regolatorie e alla pressione sulla domanda. Tuttavia, tali effetti non emergono in modo autonomo e robusto nelle dummy temporali, probabilmente perché il campione è limitato e perché parte della variazione è già assorbita dalle variabili di prezzo.

Nel quarto intervallo, gennaio 2026 – marzo 2026, SAF e *Jet fuel* mostrano movimenti estremi e sincronizzati. Questo episodio rafforza l'interpretazione secondo cui il prezzo del SAF risente ancora fortemente delle tensioni sui mercati energetici tradizionali. Nel quinto intervallo, marzo 2026 – maggio 2026, il SAF corregge al ribasso mentre alcuni driver continuano a crescere, suggerendo una possibile correzione del premio SAF dopo il picco precedente.

I *feedstock* lipidici HEFA conservano una rilevanza economica, ma il loro contributo risulta difficile da isolare statisticamente. Palm Oil e Animal Fat mostrano relazioni positive nelle regressioni a coppie, ma perdono significatività una volta incluso il *Jet fuel*.

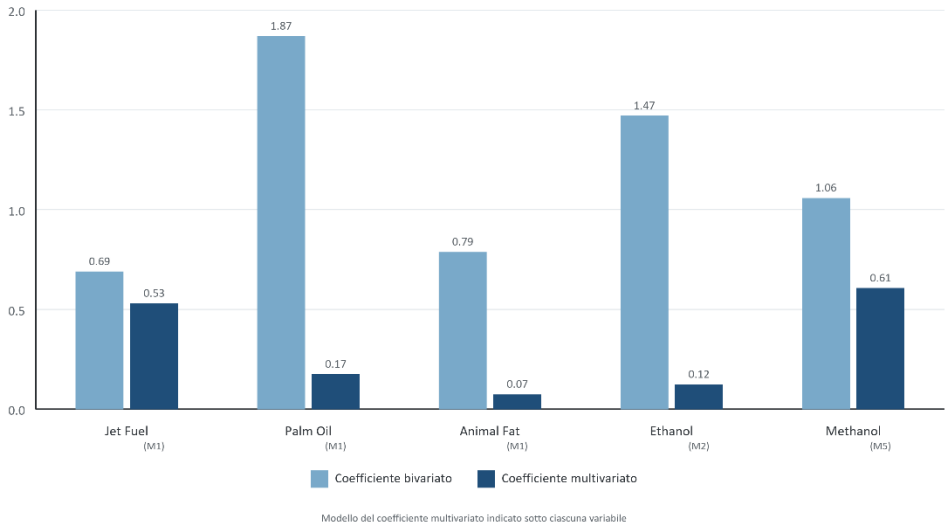


Figura 3.13: Confronto tra coefficienti bivariati e coefficienti multivariati.

I *pathway* alternativi non lipidici appaiono ancora meno stabili. L'etanolo non aggiunge potere esplicativo robusto nei modelli completi, mentre il metanolo raggiunge significatività solo quando il *benchmark* fossile viene escluso. Questo risultato suggerisce che tali input trasmettano un segnale di prezzo, ma che tale segnale sia ancora subordinato alla dinamica dominante del mercato fossile.

Le dummy temporali non risultano significative nei modelli completi, indicando che non emergono effetti sistematici specifici del 2025 o del 2026 non già catturati dalle variabili di prezzo incluse nella regressione. Questo risultato deve essere interpretato con cautela, poiché il campione disponibile è limitato; tuttavia, esso suggerisce che le variazioni temporali osservate siano spiegate principalmente dai movimenti dei *benchmark* e degli input, più che da effetti d'anno autonomi.

Un'ulteriore precisazione riguarda l'interpretazione percentuale dei risultati. I coefficienti delle regressioni non rappresentano quote di costo del prezzo del SAF, ma elasticità condizionate. Nella Figura 3.14 l'R^2 incrementale, calcolato come differenza tra l'R^2 del modello completo e quello del modello contenente le sole dummy temporali, è ripartito mediante una decomposizione Shapley tra benchmark fossile, input lipidici HEFA e input non lipidici. Il metodo considera tutte le possibili sequenze di inserimento dei blocchi, evitando che i contributi dipendano dall'ordine scelto, e li normalizza affinché la loro somma sia pari al 100%. Le percentuali indicano quindi il contributo relativo di ciascun blocco alla capacità esplicativa del modello, non il suo peso nella composizione del prezzo del SAF né un effetto causale.

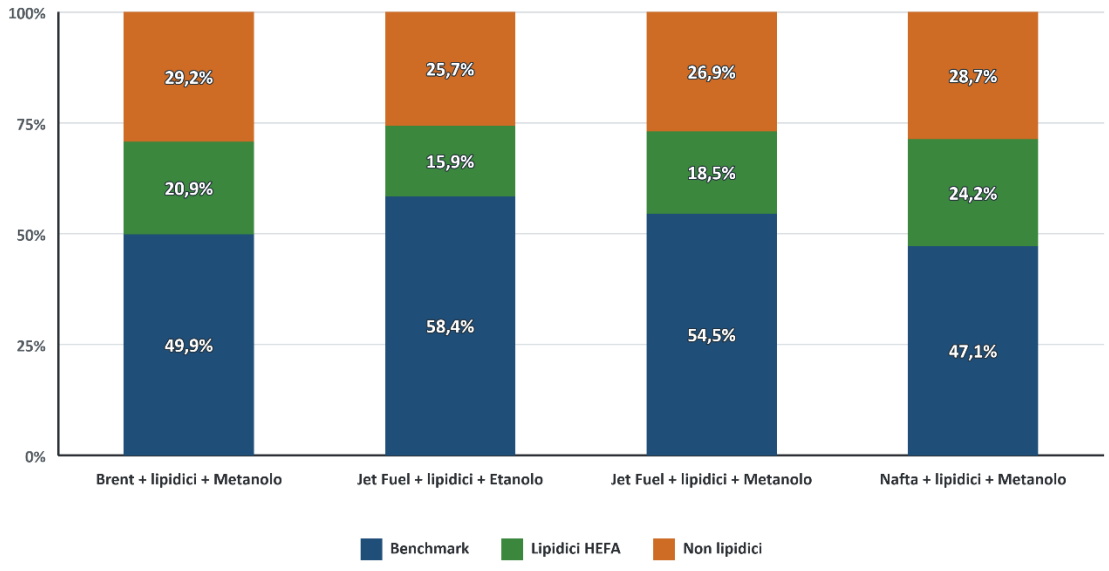


Figura 3.14: Scomposizione Shapley dell'R^2 incrementale per blocchi.

L'analisi multivariata aggregata conferma che, nel periodo novembre 2024 – maggio 2026, il prezzo del SAF risulta ancora fortemente ancorato al *benchmark* fossile, in particolare al

Jet fuel. I *feedstock* lipidici e gli input alternativi mantengono una rilevanza economica e tecnologica, ma il loro contributo autonomo non emerge con sufficiente robustezza nei modelli completi. Questo risultato riflette un mercato SAF ancora in fase di transizione, nel quale il prezzo non è ancora pienamente determinato da una filiera autonoma dei carburanti sostenibili, ma continua a essere influenzato in misura prevalente dai mercati energetici tradizionali.

3.6 Analisi del ruolo dell'Animal Fat nella dinamica del prezzo del SAF

L'Animal Fat rappresenta una variabile di particolare interesse perché appartiene al gruppo dei *feedstock* lipidici collegati ai percorsi produttivi SAF oggi più maturi, in particolare alla filiera HEFA. Il processo HEFA può infatti utilizzare oli vegetali, grassi animali e oli da cucina esausti come materie prime, con un limite massimo di miscelazione pari al 50% per il carburante sintetico approvato secondo ASTM D7566 Annex A2[26]. La presenza di input lipidici anche in altri percorsi, come CHJ e alcuni processi di *co-processing*, conferma la rilevanza dei grassi animali nel perimetro delle materie prime potenzialmente associate al costo di produzione del SAF.

Dal punto di vista metodologico, la variabile Animal Fat viene utilizzata come *proxy* del canale dei grassi animali e, più in generale, degli input lipidici residuali. La variabile non coincide con tutte le tipologie di *tallow*, cioè sego animale ottenuto dalla lavorazione di sottoprodotti animali, né con UCO o altri residui lipidici effettivamente impiegati dagli impianti SAF, né misura direttamente il costo sostenuto dai produttori. Essa consente però di verificare se il mercato dei grassi animali mostri, in alcune fasi, un segnale economicamente coerente con la dinamica del prezzo del SAF.

Il valore aggiunto del focus sull'Animal Fat non sta quindi soltanto nella sua appartenenza tecnologica alla filiera HEFA, ma anche nel ruolo economico e regolatorio dei *feedstock* residuali. Dal punto di vista economico, come analizzato nel Capitolo 1, i grassi animali sono risorse limitate e potenzialmente contese tra SAF, HVO, biodiesel, oleochimica e altri utilizzi industriali. Dal punto di vista regolatorio, soprattutto nel contesto europeo, tali materie prime assumono rilievo perché permettono di valorizzare input già presenti nel sistema produttivo e di ridurre il ricorso a colture dedicate[23]. Per questo l'Animal Fat non viene considerato soltanto come una variabile di prezzo, ma come un indicatore utile per leggere le possibili tensioni sui *feedstock* lipidici e i vincoli di scalabilità della filiera HEFA.

Questa rilevanza non implica, tuttavia, che la variabile Animal Fat debba spiegare autonomamente il prezzo del SAF. Il prezzo finale incorpora anche capacità produttiva, condizioni contrattuali, premi di sostenibilità, localizzazione geografica, benchmark del *Jet fuel* e limitata liquidità del mercato. Per questo motivo, l'analisi adotta una logica comparativa: l'Animal Fat viene letto insieme a Palm Oil, come indicatore del blocco lipidico vegetale, e a *Jet fuel*, come benchmark fossile più vicino al carburante avio convenzionale.

3.6.1 Confronto dinamico tra SAF, Animal Fat, Palm Oil e Jet fuel (novembre 2024-maggio 2026)

Il confronto dinamico viene condotto sulla finestra comune novembre 2024-maggio 2026, composta da diciannove osservazioni mensili. Novembre 2024 rappresenta l'anno base e quindi il punto di partenza dell'analisi: in quel mese i livelli sono pari a 191,56 USD/barile per il SAF, 111,90 USD/barile per Animal Fat, 158,50 USD/barile per Palm Oil e 86,25 USD/barile per *Jet fuel*. Le variazioni mese su mese servono a osservare quando SAF e Animal Fat si muovono in modo concorde o divergente, mentre Palm Oil e *Jet fuel* sono inclusi come termini di confronto per distinguere il segnale lipidico dal benchmark fossile. L'interpretazione economica viene sviluppata solo per gli episodi in cui il dato mostra un segnale sufficientemente netto.

Mese	Var. SAF	Var. Animal Fat	Var. Palm Oil	Var. *Jet fuel*
2024-11	base	base	base	base
2024-12	+6,3%	-0,7%	-5,9%	+1,6%
2025-01	-10,7%	-0,7%	-9,1%	+11,8%
2025-02	-4,0%	+1,2%	+7,2%	-2,8%
2025-03	-1,4%	+6,7%	-1,8%	-8,9%
2025-04	0,0%	+4,8%	-9,3%	-4,1%
2025-05	0,0%	+4,5%	-1,7%	-2,4%
2025-06	+7,1%	+3,4%	+5,2%	+8,6%
2025-07	+7,8%	+6,0%	+6,2%	+6,8%
2025-08	-12,7%	+2,3%	+4,2%	-8,3%
2025-09	+2,5%	-0,8%	+0,6%	+1,7%
2025-10	+11,1%	-6,0%	-0,3%	+2,7%
2025-11	-7,8%	-4,6%	-5,8%	+4,9%
2025-12	-5,0%	+4,2%	-0,2%	-12,4%
2026-01	+3,5%	+3,3%	+4,1%	+2,2%
2026-02	+22,5%	+2,5%	+1,5%	+12,4%
2026-03	+39,5%	+4,5%	+11,7%	+61,5%
2026-04	+2,4%	+3,5%	-1,9%	+6,7%
2026-05	-23,4%	+9,5%	-0,6%	+5,6%

Tabella 3.24: Variazioni mensili delle variabili nella finestra comune.

Tra le diciotto variazioni mensili, sei mesi presentano un co-aumento tra SAF e Animal Fat (giugno 2025, luglio 2025, gennaio 2026, febbraio 2026, marzo 2026 e aprile 2026), due una co-diminuzione (gennaio 2025 e novembre 2025), cinque una situazione in cui l'Animal Fat aumenta mentre SAF diminuisce (febbraio 2025, marzo 2025, agosto 2025, dicembre 2025 e maggio 2026), tre una situazione opposta (dicembre 2024, settembre 2025 e ottobre 2025) e due mesi una sostanziale stabilità del SAF a fronte di rialzi dell'Animal Fat (aprile 2025 e maggio 2025). L'interpretazione è quindi che l'Animal Fat e il SAF condividono alcuni episodi di movimento concorde, ma il loro rapporto è intermittente e spesso mediato da altri driver.

Per evitare che la lettura mese su mese nasconda il *trend* di fondo, è utile considerare anche la variazione complessiva tra l'inizio e la fine della finestra comune. Tra novembre 2024 e maggio 2026, l'Animal Fat passa da 111,90 a 169,93 USD/barile, con un aumento complessivo del 51,9%. La crescita è superiore a quella del SAF, che nello stesso periodo passa da 191,56 a 240,19 USD/barile (+25,4%), e molto più marcata rispetto a Palm Oil, sostanzialmente stabile (+1,5%). Tuttavia, il confronto con *Jet fuel*, che aumenta del 100,6%, mostra che la tensione sui lipidi residuali non basta da sola a spiegare l'evoluzione complessiva del prezzo SAF.

3.6.2 Episodi chiave e interpretazione del canale Animal Fat rispetto al benchmark fossile

In questa sezione l'obiettivo è isolare alcuni episodi in cui la combinazione tra SAF, Animal Fat, Palm Oil e *Jet fuel* permette una lettura economica più informativa. Quando il dato lo consente, la variazione osservata viene collegata a un evento esterno documentabile; negli altri casi l'episodio serve soprattutto a delimitare il ruolo del canale lipidico rispetto al benchmark fossile.

Luglio 2025 è utile come caso di co-movimento, ma non come prova del ruolo autonomo della variabile Animal Fat. In quel mese aumentano SAF (+7,8%), Animal Fat (+6,0%), Palm Oil (+6,2%) e *Jet fuel* (+6,8%). Il dato mostra che l'Animal Fat si muove nella stessa direzione del SAF, ma la simultaneità del rialzo anche su Palm Oil e *Jet fuel* impedisce di attribuire il movimento al solo canale dei grassi animali. L'episodio segnala piuttosto una fase in cui le componenti lipidiche ed energetiche si rafforzano insieme.

Ottobre 2025 rappresenta un caso opposto e più selettivo. Il SAF aumenta dell'11,1%, mentre l'Animal Fat diminuisce del 6,0% e Palm Oil resta quasi invariato (-0,3%). Nello stesso mese *Jet fuel* cresce del 2,7%. Il rialzo del SAF non può essere ricondotto all'Animal Fat; il dato è più coerente con una spinta proveniente dal blocco energetico o da fattori specifici del prezzo del SAF. Questo episodio è importante perché delimita il canale lipidico: l'Animal Fat può essere rilevante, ma non è sempre visibile nella dinamica mensile del SAF.

Novembre 2025 è il caso più informativo per il canale lipidico. SAF (-7,8%), Animal Fat (-4,6%) e Palm Oil (-5,8%) diminuiscono insieme, mentre *Jet fuel* aumenta del 4,9%. L'episodio è rilevante perché separa parzialmente il comportamento dei *feedstock* lipidici

da quello del benchmark fossile. Se il prezzo del SAF fosse stato guidato esclusivamente dal *Jet fuel*, ci si sarebbe potuti attendere un movimento nella stessa direzione del carburante convenzionale. Il fatto che SAF e *feedstock* lipidici diminuiscano nello stesso mese, mentre *Jet fuel* aumenta, rende novembre 2025 il caso più coerente con un possibile effetto della filiera HEFA.

Marzo 2026 va letto in senso diverso. SAF (+39,5%) e Animal Fat (+4,5%) aumentano entrambi, ma l'intensità del SAF è molto più vicina allo shock del *Jet fuel* (+61,5%). In questo caso esiste un contesto esterno più plausibile per il blocco energetico: le tensioni in Medio Oriente e le difficoltà nelle rotte del greggio attraverso lo Stretto di Hormuz vengono associate a un forte aumento dei costi del carburante avio nella primavera 2026[172].

Maggio 2026 è rilevante perché mostra la divergenza più forte della finestra: l'Animal Fat aumenta del 9,5%, mentre SAF diminuisce del 23,4%. In questo caso il contesto esterno aiuta a interpretare almeno il lato dell'Animal Fat: Fastmarkets segnala nella primavera 2026 un rafforzamento dei prezzi europei dei grassi animali, legato a domanda, sostituibilità con oli vegetali e maggiore interesse dei produttori statunitensi di biocarburanti[173]. Nello stesso periodo, il mercato del *Jet fuel* resta condizionato da costi energetici elevati, ma la caduta del SAF indica che in quel mese prevale una correzione del prezzo del carburante sostenibile dopo il picco di marzo-aprile.

Sintesi interpretativa

Il focus sull'Animal Fat da un lato conferma che il SAF non può essere letto esclusivamente come derivato del *Jet fuel*, perché in alcuni episodi il movimento del prezzo risulta più coerente con il blocco lipidico. Dall'altro lato, tuttavia, mostra che il canale dei grassi animali non produce una trasmissione stabile e autonoma sul prezzo finale.

L'Animal Fat va trattato come variabile di contesto del canale HEFA residuale: non misura l'intera disponibilità dei *feedstock* lipidici e non prova una trasmissione diretta dal grasso animale al prezzo SAF, ma consente di osservare un segmento rilevante dei grassi residuali potenzialmente collegati alla filiera HEFA. Il suo contributo è segnalare quando quel segmento si muove in modo compatibile con il SAF e con altre proxy lipidiche, senza trasformare tale coerenza in prova causale. La frequenza mensile dei dati, la natura indicativa del prezzo del SAF, l'uso di Animal Fat come proxy e l'assenza di informazioni su contratti, volumi, scorte e composizione effettiva dei *feedstock* impediscono infatti di attribuire con certezza una variazione mensile a un singolo evento esterno.

---

[172] *Associated Press, US airlines spent $6.7 billion on jet fuel in May, 2026.*

[173] *Prykhodko, US buying and vegoil price rallies push European animal fat prices up 10% month on month, 2026.*

3.7 Limiti dell'analisi

L'analisi ha consentito di identificare i principali driver del prezzo del SAF. Tuttavia, è necessario evidenziare alcuni limiti che circoscrivono la portata delle conclusioni formulabili sulla base dei dati disponibili.

Un primo limite riguarda la scarsità di osservazioni relative al prezzo del SAF. In presenza di un campione ridotto, le stime OLS possono produrre coefficienti caratterizzati da errori standard elevati. Per questa ragione, i risultati devono essere interpretati come indicazioni di tendenza, piuttosto che come stime definitive delle elasticità di lungo periodo. La limitata estensione del campione impone inoltre un vincolo alla complessità del modello: l'inserimento di un numero elevato di regressori nella multivariata avrebbe aumentato il rischio di sovraspecificazione e di stime instabili. Per questo motivo, il numero di variabili è stato mantenuto contenuto e la loro selezione è stata condotta sulla base di criteri teorici ed empirici.

Un ulteriore limite è rappresentato dalla forte correlazione tra i *benchmark* fossili. La multicollinearità non distorce le stime ma gonfia gli errori standard, rendendo difficile separare i contributi individuali di ogni componente. Per questa ragione i *benchmark* fossili non sono stati testati assieme, rendendo impossibile distinguere puntualmente il contributo specifico di *Jet fuel*, Brent e Nafta all'interno di un'unica regressione.

Un altro limite riguarda la natura delle variabili utilizzate. Il dataset contiene prezzi di mercato osservabili, non costi di produzione effettivi. La relazione tra il prezzo di mercato di un *feedstock* e il suo peso nel costo di produzione del SAF dipende anche da fattori non osservabili dal dataset. Ad esempio, un aumento del prezzo del Palm Oil non si trasmette al costo di produzione del SAF in maniera diretta e uniforme, poiché occorre considerare elementi quali la quantità effettivamente utilizzata nell'impianto, le condizioni contrattuali di approvvigionamento e il grado di sostituibilità con altri input. Di conseguenza, i coefficienti stimati catturano i movimenti tra i prezzi di mercato e non le trasmissioni di costo industriale.

È inoltre importante precisare che i coefficienti riportati nelle regressioni possono essere interpretati come elasticità, ma non come quote di costo dei singoli *feedstock*. Per passare dall'elasticità alla quota di costo sarebbe infatti necessario disporre di informazioni dettagliate sulla struttura produttiva e sui costi dei singoli impianti SAF. L'unica interpretazione percentuale direttamente ricavabile dai modelli riguarda quindi la quota di varianza spiegata, misurata dall'R^2, e non il peso industriale dei singoli input nel costo finale del carburante.

Come riportato anche nei paragrafi 3.1.2 e 3.2, non è disponibile una serie storica comparabile per i carburanti che riguardano il settore marittimo. L'assenza di questa serie non è un limite del dataset, ma riflette piuttosto lo stato del mercato dove i carburanti marittimi non hanno ancora raggiunto volumi e liquidità necessari per la formazione di prezzi comuni e osservabili. Il focus sul SAF è quindi una scelta forzata dalla disponibilità dei dati, mentre il marittimo rimane comunque nel quadro teorico.

Alcune variabili del dataset devono essere interpretate come proxy. Palm Oil e Animal Fat rappresentano il blocco lipidico legato alla filiera HEFA, ma non esauriscono l'insieme dei

feedstock effettivamente utilizzabili. Animal Fat, in particolare, viene impiegato come proxy del canale dei grassi animali e degli input residuali, rilevante per il contesto europeo ma non perfettamente coincidente con tutte le tipologie di *tallow*, UCO o altri lipidi residuali impiegati nella produzione di carburanti sostenibili.

Analogamente, metanolo ed etanolo non vanno interpretati come componenti necessariamente presenti nel SAF osservato, ma come intermedi o input collegabili a *pathways* alternativi rispetto all'HEFA. L'obiettivo della regressione non è ricostruire il costo industriale di un impianto specifico, ma verificare se i prezzi di questi canali mostrino un'associazione statisticamente osservabile con il prezzo del SAF.

Conclusioni

L'analisi svolta mostra che i carburanti sostenibili sono una leva necessaria per la decarbonizzazione dei trasporti aereo e marittimo, ma non possono essere considerati una soluzione autosufficiente. Il loro potenziale ambientale dipende dalla capacità di superare vincoli che non sono solo tecnologici, ma anche materiali, regolatori, logistici e finanziari.

Nel settore aeronautico, i SAF emergono come soluzione centrale nel breve e medio periodo perché consentono di intervenire sulle emissioni senza attendere un rinnovo completo della flotta o tecnologie radicalmente alternative. Tuttavia, la loro apparente immediatezza non deve essere confusa con una piena maturità di mercato. La dipendenza attuale dalla filiera HEFA, la scarsità dei *feedstock* lipidici sostenibili, la concentrazione dell'offerta, la necessità di certificazione e il differenziale di prezzo rispetto al *Jet fuel* convenzionale mostrano che lo sviluppo dei SAF richiederà una progressiva diversificazione dei *pathway* e una riduzione della dipendenza da filiere residuali limitate.

Nel trasporto marittimo, la conclusione è diversa ma complementare. L'assenza di un carburante sostenibile dominante rende il settore più flessibile sul piano tecnologico, ma anche più complesso sul piano degli investimenti. Metanolo, ammoniaca, idrogeno, biocarburanti, *e-fuels* e soluzioni ibride non sono alternative perfettamente sostituibili: ciascuna comporta requisiti specifici di stoccaggio, bunkeraggio, sicurezza, addestramento e compatibilità con la flotta. Ne deriva che la decarbonizzazione marittima non potrà fondarsi su una sola traiettoria, ma su combinazioni diverse in funzione delle rotte, delle tipologie di nave e dello sviluppo delle infrastrutture portuali. Questa pluralità, se non governata, rischia però di rallentare gli investimenti e rendere incerti i segnali di domanda.

Il quadro normativo internazionale ed europeo ha già iniziato a intervenire su questi nodi, ma la regolazione da sola non basta. ReFuelEU Aviation, FuelEU Maritime, EU ETS, RED II/RED III, il sistema CORSIA e gli strumenti IMO contribuiscono a definire obiettivi, criteri di sostenibilità e incentivi alla riduzione delle emissioni. Tuttavia, la tesi evidenzia che l'efficacia di tali strumenti dipende dalla loro capacità di dialogare con la realtà industriale. Mandati troppo distanti dalla capacità produttiva effettiva rischiano di generare pressione sui prezzi; sistemi di *carbon pricing* insufficienti non colmano il differenziale con i combustibili fossili; regole non armonizzate possono produrre distorsioni competitive, *carbon leakage* o incertezza per gli investitori. La questione decisiva non è quindi solo fissare obiettivi, ma creare le condizioni perché possano essere raggiunti.

Da questo punto di vista, la scalabilità è il vero criterio di valutazione della transizione. Nel caso dei SAF, sono necessari strumenti capaci di ridurre il rischio dei progetti, come accordi di lungo periodo, contratti per differenza, incentivi fiscali, garanzie e sostegno alle fasi *upstream* della filiera. Nel settore marittimo, assumono particolare rilievo i corridoi verdi, gli accordi contrattuali tra caricatori e armatori, lo sviluppo del bunkeraggio e la formazione del personale. In entrambi i casi, il mercato volontario può accelerare alcune iniziative, ma non appare sufficiente senza politiche pubbliche coordinate.

L'analisi empirica sul prezzo del SAF consente di precisare ulteriormente questa conclusione. Nel periodo novembre 2024-maggio 2026, il SAF risulta ancora fortemente associato ai *benchmark* fossili, in particolare al *Jet fuel*. Il primo modello empirico mostra che il solo *Jet fuel*, insieme alle dummy temporali, spiega una quota molto elevata della varianza osservata del prezzo del SAF. Questo risultato segnala che il mercato del SAF non ha ancora raggiunto una piena autonomia e dipende ancora dalle dinamiche energetiche tradizionali. Il prezzo osservato continua a riflettere la struttura commerciale del settore, nella quale il SAF viene spesso trattato come componente sostenibile con un *premium* rispetto al carburante convenzionale.

I *feedstock* lipidici e gli input collegati a *pathway* alternativi mantengono una rilevanza economica, ma il loro contributo autonomo non emerge con sufficiente robustezza nei modelli completi. Palm Oil e Animal Fat sono coerenti con il ruolo della filiera HEFA, mentre metanolo ed etanolo richiamano percorsi produttivi alternativi ancora meno centrali nella composizione osservata. Tuttavia, una volta incluso il *benchmark* fossile, questi segnali risultano in larga parte assorbiti.

L'approfondimento sull'Animal Fat conferma questa interpretazione. I grassi animali e, più in generale, i lipidi residuali sono rilevanti per la filiera HEFA perché rappresentano materie prime sostenibili ma limitate, contese tra più usi industriali ed energetici. L'analisi dinamica mostra però che il loro segnale non si trasmette in modo stabile al prezzo del SAF. In alcuni episodi, come quando SAF e *feedstock* lipidici si muovono insieme in direzione opposta al *Jet fuel*, il canale lipidico diventa più visibile; in altri momenti, invece, il prezzo del SAF segue il *benchmark* fossile o corregge per dinamiche proprie. La variabile Animal Fat contribuisce a descrivere l'ambiente di costo e scarsità della filiera HEFA, ma non può essere considerata un determinante autonomo e sufficiente del prezzo finale del SAF.

Questi risultati vanno però letti con prudenza. Il campione disponibile per il prezzo del SAF è ridotto, le regressioni catturano associazioni tra prezzi di mercato e non costi industriali effettivi, e alcune variabili sono proxy di canali produttivi più ampi. Inoltre, l'impossibilità di costruire una serie storica comparabile per i carburanti marittimi sostenibili limita l'estensione dell'analisi econometrica al solo settore aeronautico. Tali limiti riducono la portata delle conclusioni, impedendo di interpretare i risultati come elasticità definitive di lungo periodo.

La conclusione generale è che i carburanti sostenibili possono ridurre le emissioni nei settori più difficili da trasformare, ma diventano realmente efficaci solo se accompagnati da regole stabili, strumenti finanziari adeguati, infrastrutture diffuse, filiere tracciabili e mercati capaci di generare segnali di prezzo coerenti. Finché il SAF resterà fortemente ancorato ai *benchmark* fossili e i carburanti marittimi sostenibili non disporranno di mercati più maturi, la transizione resterà esposta a volatilità e incertezza. In questo senso, il prezzo non rappresenta soltanto una barriera economica, ma anche un indicatore della maturità incompleta delle filiere sostenibili.

Bibliografia

- *ACI Europe, Sustainable Aviation Fuels Financial Support/Incentives Tracker of European Airports https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/system/files/documents/2024-11/Airport%20SAF%20Initiatives.pdf*
- *Adler E. J., Martins J. R. R. A., Energy demand comparison for carbon-neutral flight. https://www.researchgate.net/publication/384808569_Energy_demand_comparison_for_carbon-neutral_flight*
- *Airports Council International & Aerospace Technology Institute, Integration of sustainable aviation fuels into the air transport system, 2022. https://www.ati.org.uk/wp-content/uploads/2022/06/saf-integration.pdf*
- *Air France-KLM Group, 2026. CLIMATE POLICY https://www.airfranceklm.com/sites/default/files/2026-03/20260123-air-france-klm-climate-policy-2026.pdf*
- *Airlines for America (A4A) / Argus Media, SAF vs Jet fuel Price Comparison. https://www.argusmedia.com/en/commodities?utm_source=google&utm_medium=ppc&utm_campaign=glo-onl-2025-05-cru-argus-crude-general-awareness-campaign-pmax-new-eu&utm_content=glo-onl-2025-02-cru-argus-crude-general-awareness-campaign-paidsearch-video&utm_term=*
- *Alessandro Martulli, Kristin Brandt, Florian Allroggen e Robert Malina, "The potential scale-up of sustainable aviation fuels production capacity to meet global and EU policy targets", Nature Communications https://www.nature.com/articles/s41467-025-66686-9*
- *Alternative Fuels Insight (AFI), DNV Platform. https://afi.dnv.com*
- *Ammonia Energy Association, All hands to the pump: Every stakeholder needed to support marine ammonia fuel. https://ammoniaenergy.org/articles/all-hands-to-the-pump-every-stakeholder-needed-to-support-marine-ammonia-fuel/*
- *ASTM International (2025), ASTM D1655-25a: Standard specification for aviation turbine fuels. https://store.astm.org/d1655-25a.html*
- *ASTM International (2025), ASTM D4054-25a: Standard practice for evaluation of new aviation turbine fuels and fuel additives. https://store.astm.org/d4054-25a.html*
- *ASTM International (2025), ASTM D7566-25a: Standard specification for aviation turbine fuel containing synthesized hydrocarbons. https://store.astm.org/d7566-25a.html*
- *ATAG, Aviation Benefit Beyond Borders. https://aviationbenefits.org/media/e5ynn4x0/abbb2024_full_report.pdf*
- *ATAG, Waypoint 2050 Third edition, 2026 report. https://aviationbenefits.org/media/4eajfrrm/aw_waypoint2050-digital-29012026.pdf*

- *ATI, SAF Integration Report. https://www.ati.org.uk/wp-content/uploads/2022/06/saf-integration.pdf*
- *Aviation Week, Rolls-Royce considers UltraFan development pause. https://aviationweek.com/mro/rolls-royce-considers-ultrafan-development-pause*
- *Aymer, D. & Smith, T. (UMAS / University College London), How the IMO's mid-term measures might shape shipping's energy choices and transition to e-fuels, gennaio 2025. https://www.u-mas.co.uk/wp-content/uploads/2025/01/How-IMO-mid-term-measures-might-shape-shippings-energy-transition-final.pdf*
- *A.P. Møller – Mærsk, Maersk engages in strategic partnerships across the globe to scale green methanol production by 2025, comunicato stampa, marzo 2022. https://www.maersk.com/news/articles/2022/03/10/maersk-engages-in-strategic-partnerships-to-scale-green-methanol-production*
- *Baccelli, O. (2025), "La decarbonizzazione del trasporto marittimo quale stimolo all'innovazione industriale", Green Unibocconi. https://green.unibocconi.eu/sites/default/files/media/attach/Baccelli%20decarbonizzazione%20e%20Autorit%C3%A0%20di%20Sistema%20Portuale.pdf?VersionId=DuEuid36SGTZ09OAnGdqKfCRtWKxZVte*
- *BCG, Sustainable Aviation Fuels Need a Faster Takeoff, agosto 2025. https://www.bcg.com/publications/2025/sustainable-aviation-fuels-need-a-faster-takeoff*
- *BloombergNEF, Sustainable Jet fuels Need High Carbon Price to Compete, aprile 2021. https://about.bnef.com/insights/commodities/sustainable-jet-fuels-need-high-carbon-price-to-compete/*
- *Boehm, R. C., Colborn, J. G., & Heyne, J. S. (2021), Comparing Alternative Jet fuel Dependencies Between Combustors of Different Size and Mixing Approaches, Frontiers in Energy Research. https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.701901*
- *Brussels Airport Company. Brussels Airport encourages the use of sustainable aviation fuel (SAF) thanks to federal government support, 2023. https://pressroom.brusselsairport.be/en-brussels-airport-encourages-the-use-of-saf*
- *Brussels Airport Company. (n.d.). SAF incentive. https://www.brusselsairport.be/en/aviation-development/charges-fees-and-incentives/saf-incentive*
- *CAAFI (2013), Fuel Readiness Level Exit Criteria for Alternative Jet fuels. https://www.caafi.org/tools/Fuel_Readiness_Level.html*
- *Cargolux. (2023, 13 giugno). Cargolux inaugurates SAF at Luxembourg airport and operates carbon neutral flight to Zhengzhou in China. Cargolux. https://www.cargolux.com/media/media-releases/2023/cargolux-inaugurates-saf-at-luxembourg-airport-and-operates-carbon-neutral-flight-to-zhengzhou-in-china/*
- *Castrodale, J. (2024), The Sustainable Aviation Fuel (SAF) Solution Framework, Climate Drift. https://climatedrift.substack.com/p/the-sustainable-aviation-fuel-saf*

- *Cazzola, P., Gérard, F. et al. (2023), Assessment of the potential of sustainable fuels in transport, European Parliament. https://doi.org/10.2861/320696*
- *CINEA, 2025. Inauguration of Port of Copenhagen's new onshore power facility https://cinea.ec.europa.eu/news-events/news/inauguration-port-copenhagens-new-onshore-power-facility-2025-06-02_en*
- *Climate Portal, Sea Transport. https://climate.mit.edu/explainers/sea-transport*
- *Commissione Europea – DG AGRI, agridata.ec.europa.eu. https://agridata.ec.europa.eu/extensions/DataPortal/home.html*
- *Commissione europea, Il Green Deal europeo, COM(2019) 640 final, 11 dicembre 2019. https://commission.europa.eu/publications/communication-european-green-deal_en*
- *Commissione europea, "Fit for 55": realizzare l'obiettivo climatico dell'UE per il 2030 lungo il cammino verso la neutralità climatica, COM(2021) 550 final, 14 luglio 2021. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52021DC0550*
- *Csonka, S., Lewis, K. C., & Rumizen, M. (2022), New Sustainable Aviation Fuels (SAF) technology pathways under development, ICAO Environmental Report. https://www.icao.int/sites/default/files/sp-files/environmental-protection/Documents/EnvironmentReport-2010/ICAO-ENV-Report-2022-F4.pdf*
- *Detsios, N., Theodoraki, S., Maragoudaki, L., Atsonios, K., Grammelis, P., & Orfanoudakis, N. G. (2023). Recent advances on alternative aviation fuels/pathways: A critical review. https://www.researchgate.net/publication/368555938_Recent_Advances_on_Alternative_Aviation_FuelsPathways_A_Critical_Review*
- *Dieterich, V. et al. (2024), Techno-economic assessment of renewable dimethyl ether production pathways, Energy. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131688*
- *DNV (2025), Maritime Forecast to 2050: Energy Transition Outlook 2025. https://www.dnv.com/maritime/maritime-forecast/*
- *DNV, LNG-fuelled container ships sustain alternative fuel share of global orderbook amid industry slowdown, comunicato stampa, 2026. https://www.dnv.com/news/2026/LNG-fuelled-container-ships-sustain-alternative-fuel-share-of-global-orderbook-amid-industry-slowdown/*
- *E-fuels, sono la soluzione per il futuro della transizione energetica? GreenPlanner Magazine. https://www.greenplanner.it/2025/01/03/e-fuels-soluzione-futuro-transizione-energetica/*
- *EASA, Artificial Intelligence and Aviation. https://www.easa.europa.eu/en/light/topics/artificial-intelligence-and-aviation-0*
- *EASA, EUROPEAN AVIATION ENVIRONMENTAL REPORT 2025. https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/eaer-downloads/EASA_EAER_2025_Book_v5.pdf*
- *EASA, ReFuelEU Aviation Annual Technical Report 2025 – 2024 in review, European Union Aviation Safety Agency, ottobre 2025. https://www.easa.europa.eu/en/document-library/general-publications/refueleu-aviation-annual-technical-report-2025*

- *EASA Safety Information Bulletin 2025 "Risks Related to Out of Specification Aviation Turbine Fuels"* https://ibac.org/assets/easa_sib_2025-01_1.pdf
- *Eindhoven Airport. (n.d.). Eindhoven Airport is going to further reduce CO_2 emissions: This is what is planned.* https://www.eindhovenairport.nl/en/eindhoven-airport-is-going-to-further-reduce-co2-emissions-this-is-what-is-planned
- *Zheng Wan, Anwei Nie, Jihong Chen, Chuan Pang, Yusheng Zhou, Transforming ports for a low-carbon future: Innovations, challenges, and opportunities, 2025.* https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0964569125000985
- *EMSA (2023), Potential of hydrogen as fuel for shipping.* https://emsa.europa.eu/publications/reports/item/5062-potential-of-hydrogen-as-fuel-for-shipping.html
- *EMSA (2025), Hazard identification of generic hydrogen fuel systems.* https://www.emsa.europa.eu/safety-of-alternative-fuels/hydrogen.html
- *EMSA, COVID-19 impact on shipping - 2nd quarter 2022.* https://www.emsa.europa.eu/newsroom/covid19-impact.html
- *Eni, Assarmatori, & Confitarma (2024), La rotta verso il net zero. Insieme per decarbonizzare il settore marittimo.* https://www.eni.com/content/dam/enicom/documents/ita/media/eventi/decarbonizzazione-trasporto-navale/La-rotta-verso%20il%20Net-zero.vers_aggiornato-a-012024.pdf
- *Eni. "Le nostre attività a Gela"* https://www.eni.com/it-IT/azioni/attivita-mondo/italia/gela.html
- *ETIP Bioenergy 2020.* https://www.etipbioenergy.eu/publications-and-reports/
- *EUROCONTROL (2024), Fuel Tankering: Economic Benefits vs Environmental Cost.* https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2020-01/eurocontrol-think-paper-1-fuel-tankering.pdf
- *European Civil Aviation Conference (ECAC) (2023), Guidance on sustainable aviation fuels (SAF).* https://www.ecac-ceac.org/images/activities/environment/ECAC_Guidance_on_SAF_DGs_endorsed_HighRes.pdf
- *European Commission CORDIS, TULIPS Project.* https://cordis.europa.eu/project/id/101036996
- *European Commission (2014), Technology Readiness Levels (TRL).* https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2014_2015/annexes/h2020-wp1415-annex-g-trl_en.pdf
- European Commission (2022), REPowerEU Plan, COM (2022) 230 final. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52022DC0230
- *European Commission / EIB Advisory, European Commission and EIB to further support decarbonisation projects from the Innovation Fund, giugno 2025.* https://climate.ec.europa.eu/news-your-voice/news/european-commission-and-european-investment-bank-further-support-decarbonisation-projects-innovation-2025-06-03_en

- *European Commission, EU Blue Economy Report 2025.* https://blue-economy-observatory.ec.europa.eu/news/eu-blue-economy-report-2025-2025-05-22_en
- *European Commission, Reducing emissions from aviation.* https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport-decarbonisation/reducing-emissions-aviation_en
- *European Commission – CINEA, Commission unlocks €2.7 billion for 54 clean industry projects under the Innovation Fund, marzo 2026.* https://cinea.ec.europa.eu/news-events/news/commission-unlocks-eu27-billion-54-clean-industry-projects-under-innovation-fund-2026-03-24_en
- *European Environment Agency (EEA), Use of auctioning revenues generated under the EU Emissions Trading System, 2025.* https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/use-of-auctioning-revenues-generated
- *European Environment Agency, Air quality around ports and airports.* https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/air-quality-around-airports-and-ports
- *European Journal of Management, Economics and Business, 2026. Price Dynamics of Renewable Diesel HVO (UCO) in Europe: A Review of Supply, Demand, and Policy Determinants, Loso Judijanto* https://www.researchgate.net/publication/401384113_Price_Dynamics_of_Renewable_Diesel_HVO_UCO_in_Europe_A_Review_of_Supply_Demand_and_Policy_Determinants
- *European Parliament & Council (2023), Directive (EU) 2023/2413 (Renewable Energy Directive).* http://data.europa.eu/eli/dir/2023/2413/o
- *European Parliament & Council (2023), Regulation (EU) 2023/1805 (FuelEU Maritime).* https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1805/oj/eng
- *European Parliament, Key issues at MEPC 84 (2026).* https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2026/780423/ECTI_BRI(2026)780423_EN.pdf
- *European Union Aviation Safety Agency (2024), EASA supporting scale up of sustainable aviation fuels through EU SAF Clearing House.* https://www.assuresafregistry.com/?gad_source=1&gad_campaignid=23835712474&gbraid=0AAAAA9oV5qn5iCZBfhsjVQOKl9RsC8d9s&gclid=Cj0KCQjwlqTRBhCBARIsANrkrxgVNUGFJm4zgyi2SsAFlbpLCAKv48Nu9oWU9idzTwDCWirqEmwabB4aAio4EALw_wcB
- *Federal Aviation Administration, ASTM D4054 Clearinghouse guide.* https://s3.wp.wsu.edu/uploads/sites/192/2018/03/clearinhouse.pdf
- *Flughafen Düsseldorf GmbH. Tariff regulations for Düsseldorf Airport, 2023.* https://www.dus.com/-/media/dus/businesspartner/aviation/entgelte-und-regularien/pdf/duesseldorf-airport-tariff-regulations_01012023.ashx

- *Getting to Zero Coalition / Global Maritime Forum, Annual Progress Report on Green Shipping Corridors 2024, novembre 2024. https://globalmaritimeforum.org/report/annual-progress-report-on-green-shipping-corridors-2024/*
- *Global Maritime Forum, IMO policy measures: Ensuring certainty for shipping's energy transition, 2025. https://globalmaritimeforum.org/insight/imo-policy-measures-ensuring-certainty-for-shippings-energy-transition/*
- *Gomes, D. M. et al. (2025), A review of advanced techniques in hydrotreated vegetable oils production, Biomass and Bioenergy. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.107689*
- *GreenVoyage 2050, JUST IN TIME ARRIVAL GUIDE: Barriers and Potential Solutions. https://greenvoyage2050.imo.org/wp-content/uploads/2021/01/GIA-just-in-time-hires.pdf*
- *Heathrow Airport, Connecting People and Planet – 2024 Progress Summary, 2025. https://www.heathrow.com/content/dam/heathrow/web/common/documents/company/heathrow-2-0-sustainability/reports/2025/2025_Sustainability_Performance_Data_Book.pdf*
- *Heathrow Airport, Gateway to Growth – Environmental Commitments, sezione "SAF incentive". https://www.heathrow.com/expansion/about-expansion/gateway-to-growth-environmental-commitments*
- *Heathrow Airport. Sustainable Aviation Fuel (SAF) https://www.heathrow.com/company/about-heathrow/heathrow-sustainability-strategy/our-carbon-strategy/sustainable-aviation-fuel-saf*
- *Heathrow Airport, Sustainable Aviation Fuel Incentive in Heathrow Aeronautical Charges, 2025. https://www.heathrow.com/content/dam/heathrow/web/common/documents/company/doing-business-with-heathrow/flights-condition-of-use/conditions-of-use-documents/2025/SAF-Incentive-Scheme-2025-Guidance-for-Airlines.pdf*
- *Heathrow SP Limited, Results for the year ended 31 December 2025, 2026. https://www.heathrow.com/content/dam/heathrow/web/common/documents/company/investor/reports-and-presentations/financial-results/2025/Heathrow_(SP)_Limited_FY_2025.pdf*
- *Herbert Smith Freehills Kramer, Sustainable Aviation Fuel – UK Revenue Certainty Mechanism, febbraio 2026. https://www.hsfkramer.com/notes/energy/2026-posts/sustainable-aviation-fuel-uk-revenue-certainty-mechanism*
- *House of Commons Library, Sustainable Aviation Fuel Bill 2024-25, agosto 2025. https://commonslibrary.parliament.uk/research-briefings/cbp-10279/*
- *IAG, Sustainable Aviation Fuel. https://www.iairgroup.com/sustainability/sustainable-aviation-fuel/*
- *IATA (2024), Fact Sheet: CORSIA and the 85% Baseline. https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/fact-sheet-corsia/*

- *IATA Global Feedstock Assessment for SAF Production, Outlook to 2050 – September 2025 https://www.iata.org/globalassets/iata/publications/sustainability/global-feedstock-assessment-for-saf-production-outlook-to-2050.pdf*
- *IATA, Global Outlook for Air Transport Trade, AI, and the energy transition (Dec 2025). https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/global-outlook-for-air-transport-december-2025/*
- *IATA, Sustainable Aviation Fuel (SAF) Accounting & Reporting Methodology. https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/iata-sustainable-aviation-fuel-saf-accounting--reporting-methodology.pdf*
- *IATA, Sustainable Aviation Fuel – SAF. https://www.iata.org/en/programs/sustainability/sustainable-aviation-fuel-saf/*
- *ICAO, 2025 ICAO Environmental Report. https://www.icao.int/sites/default/files/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2025/Final-ENV-REPORT.pdf*
- *ICAO, Annex 16 to the Convention on International Civil Aviation — Environmental Protection. https://www.iacm.gov.mz/app/uploads/2018/12/an_16_V1_Environmental-Protection_8ed_2017_rev.-12_01.07.17.pdf*
- *ICAO, Convenzione di Chicago, 1944. https://www.icao.int/publications/doc-series/convention-international-civil-aviation-doc-7300*
- *ICAO, CORSIA Eligible Fuels – Life Cycle Assessment Methodology (Version 6). https://www.icao.int/sites/default/files/environmental-protection/CORSIA/Documents/SCS-Evaluation/CORSIA_Supporting_Document_CORSIA-Eligible-Fuels_LCA_Methodology_V6.pdf*
- *ICAO, CORSIA Sustainability Criteria for CORSIA Eligible Fuels (June 2025). https://www.icao.int/sites/default/files/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA%20Eligible%20Fuels/ICAO-document-05-Sustainability-Criteria-June-2025.pdf*
- *ICAO, Long term global aspirational goal (LTAG) for international aviation. https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/LTAG.aspx*
- *ICAO, LTAG Nature and Scope of the Goal (2022) & LTAG Report. https://www.icao.int/environmental-protection/ltag-and-fuels*
- *ICAO, SAF conversion processes. https://www.icao.int/SAF/saf-conversion-processes*
- *ICAO, SAF Offtake Agreements Dashboard, 2025. https://www.icao.int/SAF/saf-offtake-agreements*
- *ICAO (2024), Co-processing and revamping: How to use existing refineries to produce SAF. https://www.icao.int/sites/default/files/environmental-protection/Documents/ACT-SAF/ACT-SAF-Series-15-coprocessing-and-revamping.pdf*
- *ICCT (International Council on Clean Transportation), Why and how to bring down the cost of SAF, november 2025. https://theicct.org/why-and-how-to-bring-down-the-cost-of-saf-sept25/*

- *ICF, 2024. The role of airports in scaling up Sustainable Aviation Fuel (SAF) https://www.google.com/search?client=safari&rls=en&q=%E2%80%A2+ICF%2C+2024.+The+role+of+airports+in+scaling+up+Sustainable+Aviation+Fuel+(SAF)&ie=UTF-8&oe=UTF-8*
- *IEA, Ammonia technology roadmap. https://www.iea.org/reports/ammonia-technology-roadmap*
- *IEA, Aviation, IEA, Paris, 2024. https://www.iea.org/energy-system/transport/aviation*
- *IEA, Clean Energy Technology Guide (ETP Dataset). https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/etp-clean-energy-technology-guide*
- *IEA, Data and statistics: charts. https://www.iea.org/data-and-statistics/charts*
- *IEA, Delivering Sustainable Fuels - Pathways to 2035 https://www.iea.org/reports/delivering-sustainable-fuels*
- *IEA, Global hydrogen review 2023. https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023*
- *IEA, Shipping in the World Energy Outlook 2025 https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2025/11/25_1119_04_IEA_Klain_Workshop_Zero_Emission_Shipping.pdf*
- *IEA Bioenergy (2020), Progress towards biofuels for marine shipping. https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2021/11/Progress-towards-biofuels-for-marine-shippingT39-report_June-2021_Final.pdf*
- *IEA Bioenergy, Progress in Commercialization of Biojet / Sustainable Aviation Fuels (SAF). https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2024/06/IEA-Bioenergy-Task-39-SAF-report.pdf*
- *IMO, Marine Environment. https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/default.aspx*
- *IMO (2015), Resolution MSC.391(95): IGF Code. https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCResolutions/MSC.391%2895%29.pdf*
- *IMO (2020), Interim guidelines for the safety of ships using methyl/ethyl alcohol as fuel. https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Documents/MSC.1-Circ.1621%20-%20Interim%20Guidelines%20For%20The%20Safety%20Of%20ShipsUsing%20MethylEthyl%20Alcohol%20As%20Fuel%20(Secretariat)%20(2).pdf*
- *IMO (2023), Resolution MEPC.377(80): 2023 IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships. https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/annex/MEPC%2080/Annex%2015.pdf*
- *IMO, Marine Environment Protection Committee – 83rd session (MEPC 83) Summary, aprile 2025. https://www.imo.org/en/mediacentre/meetingsummaries/pages/mepc-83rd-session.aspx*

- *International Civil Aviation Organization. (n.d.). Oslo Initiative – Avinor Bioport. ICAO. https://www.icao.int/SAF/stakeholder-action-groups-projects-oslo-initiative-avinor-bioport*
- *International Civil Aviation Organization (2022), Resolution A41-21: Climate change. https://www.icao.int/sites/default/files/Resolution_A41-21_Climate_change.pdf*
- *International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL), Annex VI – Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ships. https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/air-pollution.aspx*
- *IPCC (2006/2024), Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (Volume 2: Mobile Combustion). https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_3_Ch3_Mobile_Combustion.pdf*
- *IRENA, Enablers to decarbonize the hard-to-abate sectors. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Apr/IRENA_G7_Decarbonising_hard_to_abate_sectors_2024.pdf*
- *IRENA & Ammonia Energy Association (2022), Innovation outlook: Renewable ammonia. https://www.irena.org/publications/2022/May/Innovation-Outlook-Renewable-Ammonia*
- *IRENA & Methanol Institute (2021), Innovation outlook: Renewable methanol. https://www.irena.org/publications/2021/Jan/Innovation-Outlook-Renewable-Methanol*
- *ITF, Transport Outlook 2023. https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2023/05/itf-transport-outlook-2023_4466cd78/b6cc9ad5-en.pdf*
- *James, B. (2024), Ethanol and methanol. https://climate.benjames.io/ethanol-and-methanol/*
- *Jeswani, H. K. et al. (2020), Environmental sustainability of biofuels: A review, Royal Society A. https://doi.org/10.1098/rspa.2020.0351*
- *Johnson, E. (2019), Process technologies and projects for BioLPG, Energies. https://doi.org/10.3390/en12020250*
- *Liuzzi, D. et al. (2020), Increasing dimethyl ether production from biomass-derived syngas, Sustainable Energy & Fuels. https://doi.org/10.1039/D0SE01172J*
- *Lloyd's Register & UMAS (2018), Zero-emission vessels 2030: How do we get there? https://www.lr.org/en/knowledge/research-reports/2017/zero-emission-vessels-2030/*
- *Lloyd's Register, MEPC 84 Summary Report (2026). https://maritime.lr.org/MEPC-84-Summary-Report*
- *Macrotrends.net/EIA. https://www.macrotrends.net/stocks/stock-screener*
- *Mariano, J., & Emmett, E. (2023), What to know about renewable diesel and biodiesel, Baker Institute. https://www.bakerinstitute.org/research/what-know-about-renewable-diesel-and-biodiesel*

- *Maritime Executive, Carbon Capture, Fuel Cells, and Wind Propulsion for Net-Zero Cruise Ship, ottobre 2025. https://maritime-executive.com/article/carbon-capture-fuel-cells-and-wind-propulsion-for-net-zero-cruise-ship*
- *MASE (Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica), L'Accordo di Parigi (Traduzione non ufficiale). https://www.mase.gov.it/portale/documents/d/guest/accordo-di-parigi-traduzione-non-ufficiale-pdf*
- *MASE, Protocollo di Kyoto della Convenzione sui Cambiamenti Climatici (1997). https://www.mase.gov.it/portale/documents/d/guest/documentazione_-_il_protocollo_di_kyoto_della_convenzione_sui_cambiamenti_climatici-pdf*
- *McKinlay, C. J. et al. (2022), Alternative shipping fuels: Modelling wind-farm-to-wake emissions, Ocean Engineering. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112724*
- *Menezes, N. de A. et al. (2022), Obtaining bioLPG via the HVO route in Brazil, Sustainability. https://doi.org/10.3390/su142315734*
- *Methanol Institute (2018), Renewable methanol report. https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2019/01/MethanolReport.pdf*
- *Mission Possible Partnership / Energy Transitions Commission, Making Net-Zero Aviation Possible, luglio 2022. https://www.energy-transitions.org/publications/making-net-zero-aviation-possible/*
- *Moeve/Cepsa e Bio-Oils, Construction of the 2G biofuels plant in Huelva. https://www.moeveglobal.com/en/press/cepsa-and-bio-oils-build-the-largest-2g-biofuel-plant*
- *Moeve, Supply of over 18,000 cubic meters of SAF in 2024. https://www.moeveglobal.com/en/press/moeve-delivers-18000-cubic-meters-saf-fuel*
- *Munich Airport, Strategy 2030. https://www.munich-airport.com/strategy-2030-263402*
- *NACO Netherlands Airport Consultants. Stuttgart Airport Future Fuels Feasibility Project Report, 2025. https://pimcoreassetsbscvec.blob.core.windows.net/images/public/var/assets/flughafen-stuttgart/news/2025/20250224_SAF%20Feasibility%20Report%20en-Flughafen-Stuttgart.pdf*
- *Neste. "Neste Marine fuels" https://www.neste.com/products-and-innovation/fossil-products/marine-fuels*
- *NewClimate Institute (2023), The impact of international aviation and shipping on national climate targets. https://newclimate.org/*
- *Norsk e-Fuel. (2022, 29 marzo). Lux-Airport invests into Norsk e-Fuel. Norsk e-Fuel. https://www.norsk-e-fuel.com/articles/lux-airport-invests-into-norsk-e-fuel*
- *Norsk e-Fuel / Nordic Electrofuel, Pilot Plant at Herøya Industrial Park, 2024 — PMC/NCBI review su e-SAF production pathways. https://nordicelectrofuel.no/e-fuel_pilot/*
- *Norsk e-Fuel. (n.d.). Projects. Retrieved, 2026. https://www.norsk-e-fuel.com/projects*

- *Pan American Finance, Global SAF Report 2024 – SAF Offtake, gennaio 2025.* *https://panamericanfinance.com/insights/energy-transition/global-saf-report-2024/saf-offtake-saf24/*
- *Prussi, M., Lee, U. et al. (2021), CORSIA: The first internationally adopted approach to calculate life cycle GHG emissions, Renewable and Sustainable Energy Reviews.* *https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121006833*
- *Prussi, M., Padella, M. et al. (2019), Review of technologies for biomethane production, Journal of Cleaner Production.* *https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.271*
- Prykhodko, V. (2026, May 7). *US buying and vegoil price rallies push European animal fat prices up 10% month on month*. Fastmarkets. https://www.fastmarkets.com/insights/us-buying-and-vegoil-price-rallies-push-european-animal-fat-prices-up-10-month-on-month/
- *Qyyum, M. A. et al. (2020), Biogas to liquefied biomethane: Assessment of 3P's, Renewable and Sustainable Energy Reviews.* *https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109561*
- *Raihan, A. (2025), Sustainable aviation: A critical review of policies, technologies, and future pathways, Journal of the Air Transport Research Society.* *https://doi.org/10.1016/j.jatrs.2025.100080*
- *Roland Berger (2020), Sustainable aviation fuels: The best solution to decarbonize aviation?* *https://www.rolandberger.com/publications/roland_berger_sustainable_aviation_fuels.pdf*
- *Royal Schiphol Group, Annual Report - Environment and society, 2025.* *https://assets.ctfassets.net/biom0eqyyi6b/4T3fJoSPUNqDIusbiA6mrQ/6edbd574e2c7e3dc1bfc137bfb379451/Performance_-_Environment_and_society.pdf*
- *Salmi, H. M. The impact of the traffic charge incentives on Sustainable Aviation Fuel, 2023.* *https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/801112/Salmi_Hanna.pdf?sequence=2*
- *SEA-LNG (2021), Understanding energy density of future fuels.* *https://sea-lng.org/2021/07/understanding-energy-density-of-future-fuels-could-be-key-to-clearer-decarbonisation-decision-making/*
- *SEA-LNG (2025), Focus on practicality drives LNG pathway growth in 2024.* *https://www.lr.org/en/knowledge/research-reports/2025/fuel-for-thought-lng-report/?creative=796944158051&keyword=lng%20marine%20fuel&matchtype=p&network=g&device=c&utm_source=google&utm_campaign=&utm_medium=cpc&utm_content=&utm_term=lng%20marine%20fuel&gad_source=1*
- *SEA S.p.A. SEA: a Milano Malpensa e Milano Linate confermati incentivi alle compagnie aeree che utilizzano i biocarburanti (SAF), 2024.* *https://milanairports.com/it/media/comunicati-stampa/sea-milano-malpensa-e-milano-linate-confermati-incentivi-alle-compagnie*

- [1]*Schiphol. (n.d.). More sustainable fuels, 2026 https://www.schiphol.nl/en/sustainability/in-the-air/more-sustainable-fuels/*
- *Schiphol Newsroom, Schiphol to invest in Europe's first sustainable kerosene plant. https://news.schiphol.com/schiphol-to-invest-in-europes-first-sustainable-kerosene-plant/*
- *Schiphol Newsroom, Synkero builds facility in the port of Amsterdam, producing sustainable aviation fuel from CO_2. https://news.schiphol.com/synkero-builds-facility-in-the-port-of-amsterdam-producing-sustainable-aviation-fuel-from-co2/*
- *Ship & Bunker, Bunker Price Index. https://shipandbunker.com/prices/av/global/av-glb-global-average-bunker-price*
- *SkyNRG, SkyNRG Delfzijl (DSL-01). https://skynrg.com/producing-saf/skynrg-delfzijl-dsl-01/*
- *Smart Freight Centre, Voluntary Market Based Measures Framework for Logistics Emissions. https://smart-freight-centre-media.s3.amazonaws.com/documents/SFC_MBM_FRAMEWORK_2023_Oct.pdf*
- *Smith, T. et al. (2021), A strategy for the transition to zero-emission shipping, UMAS/WEF. https://www3.weforum.org/docs/WEF_A%20Strategy_for_the_Transition_to_Zero_Emission_Shipping_2021.pdf*
- *Soone, J., ReFuelEU Aviation initiative: Summary of Parliament's and Council's positions (Briefing PE 739.347). European Parliamentary Research Service (EPRS), 2023. https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2023/739347/EPRS_BRI(2023)739347_EN.pdf*
- *Stellarix (2025), Bio-LNG: The clean fuel evolution transforming LNG's future. https://stellarix.com/insights/articles/bio-lng-clean-fuel-evolution-transforming-lng-future*
- *Stuttgart Airport. (n.d.). Projects: Sustainable aviation fuel. Stuttgart Airport. https://www.stuttgart-airport.com/en/company/airport-development/projects*
- *Swedavia: Sustainable Aviation Fuel (SAF) - Incentive Programme, 2025. https://www.swedavia.com/contentassets/6452d7c55b3c42da80b1aeecde456925/saf-incentive-programme-2025.pdf*
- *The Economics of Sustainable Aviation Fuels: Market Trends and Policy Challenges in Selected EU Countries, 2026. Neverauskienė, L. O., Sikorskaitė-Narkūnė, E., & Tvaronavičienė, M. https://www.mdpi.com/2071-1050/18/1/127*
- *Thunder Said Energy, Decarbonize shipping: Alternative fuel costs. https://thundersaidenergy.com/downloads/decarbonize-shipping-alternative-fuel-costs/*
- *TotalEnergies / Air France-KLM, Air France-KLM ramps up its SAF offtake agreement with TotalEnergies. https://totalenergies.com/newsroom/air-france-klm-ramps-its-saf-offtake-agreement-totalenergies-which-will-supply/?lang=eng*

- *Tradingeconomics.com/Bursa Malaysia.*
- *UK Department for Transport, SAF Revenue Certainty Mechanism: Indicative heads of terms and contract allocation, gennaio 2026. https://www.gov.uk/government/consultations/saf-revenue-certainty-mechanism-indicative-heads-of-terms-and-contract-allocation*
- *UMAS (2021), A strategy for the transition to zero-emission shipping, Getting to Zero Coalition. https://globalmaritimeforum.org/report/a-strategy-for-the-transition-to-zero-emission-shipping/*
- *UNDP, NDC Insight Series (Issue 9, Feb 2026). https://climatepromise.undp.org/sites/default/files/2026-02/NDC%20Insights%209_Final%20Issue_Feb%202.pdf*
- *UNFCCC, 2025 NDC Synthesis Report. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma2025_08.pdf*
- *Unione Europea, Direttiva (UE) 2003/87/CE, c.d. Direttiva EU ETS. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:02003L0087-20230605*
- *Unione Europea, Direttiva (UE) 2018/2001, c.d. RED II. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001*
- *Unione Europea, Direttiva (UE) 2023/958. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023L0958*
- *Unione Europea, Direttiva (UE) 2023/959, recante riforma dell'EU ETS e inclusione progressiva del trasporto marittimo nel sistema. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023L0959*
- *Unione Europea, Direttiva (UE) 2023/2413 (RED III). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202302413*
- *U.S. Bureau of Labor Statistics/FRED. https://fred.stlouisfed.org/tags/series?t=bls*
- *U.S. Energy Information Administration (EIA), Weekly Retail Gasoline and Diesel Prices / Petroleum and Other Liquids. https://www.eia.gov/petroleum/gasdiesel/*
- *Regolamento (UE) 2015/757, c.d. MRV Shipping Regulation. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015R0757*
- *Unione Europea, Regolamento (UE) 2021/1119, c.d. Normativa europea sul clima, artt. 2 e 4. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2021/1119/oj/ita*
- *Unione Europea, Regolamento (UE) 2023/2405 (ReFuelEU Aviation). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202302405*
- *United Nations, Review of maritime transport 2025. https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2025_en.pdf*
- *VINCI Airports, Strategic partnership to study and implement an e-SAF supply chain with H2V and Hy2gen. https://en.newsroom.vinci-airports.com/news/vinci-airports-signs-a-strategic-partnership-to-study-and-implement-a-sustainable-synthetic-fuels-supply-chain-e-saf-with-the-companies-h2v-and-hy2gen-b0544-46ae7.html*

- *Vinson & Elkins LLP, IMO Postpones Adoption of Net-Zero Framework, gennaio 2026.* *https://www.velaw.com/insights/imo-postpones-adoption-of-net-zero-framework/*
- *World Economic Forum (WEF), Global Aviation Sustainability Outlook 2025.* *https://reports.weforum.org/docs/WEF_Global_Aviation_Sustainability_Outlook_2025.pdf*
- *World Economic Forum, Global Aviation Sustainability Outlook 2026.* *https://reports.weforum.org/docs/WEF_Global_Aviation_Sustainability_Outlook_2026.pdf*
- *World Economic Forum, Disponibilità di feedstock.* *https://www.weforum.org/*
- *World Ports Sustainability Program, 2024. Port of Barcelona – Cold that warms: How the Port Is powering the City sustainably* *https://sustainableworldports.org/project/port-of-barcelona-cold-that-warms-how-the-port-is-powering-the-city-sustainably/*
- Yamat, R. (2026, July 8). *US airlines' monthly fuel spending topped $6 billion again in May, up 84% from year ago*. AP News. https://apnews.com/article/jet-fuel-prices-us-airlines-iran-war-73c67ea89f949b8bdb75cd2ecec52a53
- *Zanobetti, F. et al. (2025), Quantitative sustainability assessment of e-fuels for maritime transport, Sustainable Energy & Fuels.* *https://doi.org/10.1039/D5SE00821B*

Ringraziamenti

Desidero innanzitutto esprimere la mia più sincera gratitudine al professor Carlo Cambini, relatore di questa tesi, per la grande disponibilità, la competenza e la guida con cui mi ha accompagnato durante la realizzazione del presente lavoro. I suoi consigli e le sue puntuali osservazioni sono stati fondamentali per portare a compimento questo percorso.

Un sentito ringraziamento va anche al dottor Flavio Pino per il supporto fornito durante la redazione della tesi, per la disponibilità al confronto e per l'attenzione dedicata alle diverse fasi del lavoro.

Un ringraziamento speciale va a Marta e Matteo, con i quali ho condiviso la realizzazione di questo lavoro. Grazie per la collaborazione, per il confronto continuo e per tutti i momenti vissuti insieme durante questo percorso.

Ringrazio il Politecnico di Torino per le conoscenze, le competenze e le opportunità che mi ha offerto durante questi anni di studio. Questo percorso magistrale ha rappresentato una tappa fondamentale della mia formazione, permettendomi di crescere non soltanto dal punto di vista accademico e professionale, ma anche da quello personale.

Un sincero ringraziamento va anche all'Università di Twente, che mi ha accolto durante il mio periodo Erasmus. Dopo l'esperienza internazionale già vissuta nel corso della laurea triennale, avere la possibilità di intraprendere un secondo percorso di mobilità all'estero ha rappresentato per me un'ulteriore occasione di crescita e di apertura verso realtà differenti. Questa esperienza, vissuta in modo diverso rispetto alla prima, mi ha consentito di confrontarmi nuovamente con un ambiente internazionale e multiculturale e di ampliare ancora una volta i miei orizzonti. Porto con me le conoscenze acquisite, i legami costruiti e i numerosi momenti vissuti, che hanno arricchito profondamente il mio percorso umano e accademico.

Ringrazio tutti gli amici che hanno condiviso con me, in momenti e contesti diversi, questo percorso. Agli amici di sempre e a quelli incontrati più recentemente, grazie per la presenza, per il sostegno e per tutti i momenti di confronto e di leggerezza che hanno reso questi anni più ricchi e significativi.

A Giuseppe, incontrato durante il mio secondo Erasmus, ma che mi sembra di conoscere da una vita. Sin dai primi momenti si è creata tra noi un'intesa spontanea e profonda, fondata sulla sincerità, sulla complicità e sulla possibilità di confrontarci apertamente. Grazie per i pensieri e le riflessioni condivise, ma soprattutto per tutti i momenti di leggerezza, le risate e le esperienze vissute insieme.

A Jacopo, conosciuto durante il mio primo Erasmus, nel corso della laurea triennale, e diventato da allora un caro amico. Negli anni abbiamo coltivato un rapporto diretto, non privo di discussioni, ma proprio per questo sincero. Condividere un modo simile di osservare molte situazioni della vita mi ha consentito di trovare in te una persona con cui parlare apertamente, affrontare anche temi importanti e condividere momenti di leggerezza.

Grazie per le esperienze vissute e per la crescita personale che ha accompagnato la nostra amicizia.

Un pensiero particolare va ai miei amici di sempre: Matteo, Mario e Luigi. Oltre agli anni e alle esperienze condivise, ci accomuna anche l'essere tutti figli unici, una condizione che ci ha spesso permesso di comprenderci rispetto a dinamiche difficili da spiegare agli altri. Questa sensibilità comune e, forse, un modo più introspettivo di vivere le emozioni e di osservare ciò che ci circonda hanno reso possibile tra noi un livello di comprensione particolare.

A Matteo, che so di poter chiamare in qualsiasi momento e con il quale posso parlare di tutto. Ho sempre attribuito un grande valore ai tuoi consigli, perché so che nascono dalla sincerità e dalla profonda conoscenza reciproca costruita nel corso degli anni. Grazie per l'ascolto, per la capacità di trovare le parole giuste nei momenti di incertezza, per la disponibilità e per essere una presenza sulla quale posso sempre contare.

A Mario, amico di una vita, con il quale ho condiviso esperienze, cambiamenti e numerosi passaggi importanti. Le nostre vite ci hanno spesso portato ad affrontare situazioni e percorsi simili, permettendoci di comprendere con maggiore immediatezza ciò che l'altro stava vivendo e il momento che stava attraversando. Grazie per i confronti sui temi più diversi, per le risate e per tutti i momenti vissuti insieme. So di poter sempre contare su di te.

A Luigi, con il quale condivido ricordi che risalgono all'infanzia e un legame che il tempo non ha mai cancellato. Nonostante gli anni trascorsi e i diversi percorsi intrapresi, siamo riusciti a conservare un rapporto speciale, fatto di affetto, complicità e una storia comune che continuerà sempre a unirci.

Il ringraziamento più profondo va ai miei genitori, che mi hanno sempre sostenuto nel mio percorso di studi, condividendo le mie soddisfazioni e appoggiandomi nei momenti di difficoltà. Mi avete dato la forza necessaria per affrontare le sfide che si sono presentate, senza mai farmi mancare il vostro amore, la vostra fiducia e il vostro sostegno. Ciò che sono oggi è merito vostro, di tutto quello che avete fatto e che continuate ogni giorno a fare per me.

Ai miei compari, Graziella e Antonello, che mi hanno accompagnato con affetto e attenzione durante questi anni. Il vostro sostegno, i vostri consigli e la vostra presenza hanno rappresentato per me un riferimento prezioso durante tutto il percorso.

Ringrazio zio Giovanni e i miei cugini per l'affetto, la vicinanza e tutti i momenti condivisi. Sapere di poter contare sulla presenza di una famiglia unita ha rappresentato per me una fonte costante di forza e serenità.

Un grazie particolare va a mio cugino e compare Matteo, con il quale ho costruito nel tempo un rapporto speciale. Per me sei come un fratello maggiore: una persona sulla quale so di poter sempre contare. Grazie per l'affetto che mi hai sempre dimostrato.

Infine, desidero rivolgere un pensiero particolare a mia zia, venuta a mancare di recente. Avrei voluto condividere con lei la gioia di questo momento e averla accanto nel giorno in cui questo lungo percorso giunge al suo compimento.

Di lei porterò sempre con me il ricordo della serietà e della dedizione con cui ha svolto il proprio lavoro di professoressa, ma anche della sua spontaneità e, soprattutto, della sua onestà e integrità. Sono qualità che sento appartenere profondamente alla nostra famiglia. In lei ho sempre riconosciuto un esempio concreto di valori e principi nei quali desidero rispecchiarmi e che vorrei riuscire a portare con me nel corso della vita.

Anche se oggi non può essere fisicamente presente, sento che una parte di lei è racchiusa in questo traguardo. A lei dedico questo risultato.