POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Gestionale – Classe L/9
Corso di Laurea in Ingegneria Gestionale



Tesi di Laurea di II livello

Analisi dei rischi e valutazione delle policy per la diffusione dei Sustainable Aviation Fuels: linee guida per la realizzazione di una Regulatory Sandbox nazionale

Relatore:
Prof. Carlo Cambini

Candidato:
Francesca Arciprete

Anno Accademico 2026-2027

Indice

Introduzione e obiettivi della tesi 1
1 I Sustainable Aviation Fuels (SAF) 2
1.1. Dalle biomasse agli e-fuels: mappatura dei feedstock e delle tecnologie per l'aviazione sostenibile.3
1.1.1 Analisi delle categorie di feedstock per la decarbonizzazione aeronautica 3
1.1.2 Pathways: processi di conversione chimica e le certificazioni internazionali 5
1.1.3 Stato attuale del mercato: capacità produttiva e gap rispetto ai target normativi 10
1.2 Il divario economico: costi di produzione e la necessità di strumenti di supporto.... 19
1.2.1 Analisi dei costi di produzione: CAPEX, OPEX e feedstock....19
1.2.2 Le dinamiche di mercato: minimum selling price, price gap e green premium 21
2 Il paradigma della regulatory sandbox: teoria, funzionamento e sperimentazione 30
2.1 Evoluzione storica: dal settore Fintech all'applicazione nei settori Hard-to-Abate e nell'aviazione sostenibile.... 30
2.1.1 Quadro normativo dei SAF: barriere regolatorie, impatto del ReFuelEU e il contesto istituzionale italiano 32
2.1.2 Architettura Sanzionatoria di ReFuelEU: esenzioni, penalità e criticità di mercato 37
2.1.3 Oltre la regolamentazione tradizionale: il concetto di "spazio di sperimentazione controllato" 38
2.1.4 Il superamento del "Dilemma di Collingridge": bilanciare l'innovazione tecnologica dei SAF con la necessità di controllo preventivo 39
2.2 La ratio economica e funzionale: perché una Sandbox per i SAF?.... 41
2.2.1 Riduzione dell'incertezza normativa e tecnica: creare un ambiente safe-to-fail per i nuovi vettori energetici41
2.2.2 Incentivazione agli investimenti: come la stabilità normativa temporanea attrae capitali privati nel settore biocarburanti ed e-fuels....42
2.2.3 Il ruolo del "Regulatory Learning": acquisire evidenze empiriche per l'aggiornamento dei requisiti di certificazione 43
2.3 L'Architettura del Processo: fasi operative e procedure di costruzione.... 44
2.3.1 Fase di progettazione (design): processo di selezione dei partecipanti, criteri di ammissibilità e creazione del prototipo normativo 44
2.3.2 Fase di esecuzione e monitoraggio (Testing): gestione delle deroghe temporanee e supervisione attiva da parte delle autorità aeronautiche 52
2.3.3 Fase di valutazione e strategia d'uscita (exit): dalla sperimentazione alla norma definitiva 54
2.4 Analisi di casi studio e best practices internazionali.... 58
2.4.1 L'esperienza pionieristica del Regno Unito: la sandbox della Civil Aviation Authority (CAA) per i carburanti innovativi....58
2.4.2 Iniziative Europee e il ruolo di EASA: la costruzione di un ecosistema "pre-sandbox" per i carburanti innovativi.....60

3 Analisi della filiera e mappatura degli stakeholder: i candidati per una regulatory sandbox nel mercato SAF 66
3.1 Offerta: produttori e fornitori di SAF ... 69
3.2 Hub logistici: gestori aeroportuali ... 77
3.3 Domanda: compagnie aeree ... 84
3.4 Istituzioni e autorità di regolazione ... 88
4 Politiche di mitigazione e incentivi di mercato ... 91
4.1 I Contratti per Differenza (CfD) e i Carbon Contracts for Difference (CCfD) ... 92
4.1.1 Allocazione del rischio lungo la filiera dei SAF ... 96
4.1.2 Bilancio dei vantaggi e svantaggi e dimensionamento quantitativo dello schema CfD/CCfD nel contesto nazionale ... 99
4.2 Il sistema "Book and Claim" ... 102
4.2.1 Allocazione del rischio lungo la filiera dei SAF ... 103
4.2.2 Analisi comparativa di Pro e Contro. ... 106
4.3 Regolazione e leve operative nel sistema aeroportuale. ... 109
4.3.1 Tariffe aeroportuali sub-articolate ... 109
4.3.2 Prioritizzazione ecologica nell'allocazione degli slot aeroportuali ... 112
5 Caso studio: simulazione del processo di costruzione di una sandbox ... 116
5.1 Analisi multicriterio e rating delle leve regolatorie per la sandbox nazionale ... 116
5.1.1 Analisi di sensitività del modello multicriterio per le leve della sandbox ... 120
5.2 Realizzazione della sandbox ... 123
5.3 Test diagnostici preliminari: Legality Test e Suitability Test ... 124
5.3.1 Legality Test ... 124
5.3.2 Suitability Test ... 125
5.4 Step 1: pianificazione e design della sandbox ... 126
5.4.1 Selezione dei partecipanti ... 127
5.4.2 Mappatura degli stakeholders ... 129
5.4.3 Definizione dello scopo e degli obiettivi della sandbox ... 130
5.4.4 Piano di valutazione delle risorse necessarie all'attivazione della sandbox ... 132
5.5 Step 2: esecuzione della regulatory sandbox ... 133
5.5.1 Valutazione delle candidature e stesura del Testing Plan ... 133
5.5.2 Identificazione e gestione dei rischi ... 135
Conclusioni ... 137
Bibliografia e sitografia ... 139

Introduzione e obiettivi della tesi

Il presente lavoro di tesi affronta il tema della decarbonizzazione del settore dell'aviazione, riprendendo e approfondendo le basi teoriche del report redatto presso il politecnico di Torino dal titolo "*Sustainable Aviation Fuels: tecnologie, mercato e misure verso una roadmap nazionale*". La ricerca svolta si incentra nello specifico sui nuovi carburanti di natura non fossile a basso impatto ambientale inclusi nella denominazione collettiva di *Sustainable Aviation Fuels* (SAF). Questi nuovi vettori energetici rappresentano oggi una risorsa di primario interesse per le istituzioni internazionali del settore, costituendo la soluzione più efficace per il raggiungimento dei target di riduzione graduale delle emissioni di CO_2 stabiliti a livello globale.

Nel 2024, con l'entrata in vigore del regolamento europeo della *RefuelEU Aviation*, sono stati definiti gli obblighi progressivi di miscelazione dei SAF con il cherosene convenzionale, con lo scopo di accompagnare gradualmente l'introduzione di tali carburanti in un ecosistema fortemente consolidato.Per sostenere questa sfida, destinata a modificare significativamente ogni fase dell'attuale supply chain, la Commissione Europea e gli organismi internazionali propongono idonei sistemi di *policy* per favorirne la penetrazione nel mercato. Tra diverse misure analizzate, lo studio del Politecnico di Torino individua nelle *regulatory* sandboxes uno strumento strategico per poter far fronte all'elevato livello di incertezza, intrinseco all'adozione dei nuovi carburanti, la cui filiera è soggetta a rigidi standard di sicurezza. Definite dall'OECD come ambienti di "*sperimentazione controllata e supervisionata"*, le *regulatory sandboxes* consentono di testare temporaneamente gli effetti di una specifica regolamentazione su scala ridotta, beneficiando in via provvisoria di deroghe normative per valutare la fattibilità e la scalabilità dell'innovazione prima di una revisione del *framework* regolatorio permanente.

La progettazione di una *regulatory sandbox* si sviluppa attraverso una sequenza strutturata di analisi preliminari formalmente articolate nelle linee guida ufficiali pubblicate dall'OECD. Il processo di design parte dall'analisi dettagliata dello stato di fatto (*as-is*), dalla mappatura degli ostacoli normativi e dall'identificazione degli *stakeholder* coinvolti, per poi proseguire con la valutazione dell'allocazione dei rischi. Si definiscono così le basi informative per elaborare il piano di gestione dell'esperimento e la stesura di un adeguato *exit plan*, volto a contenere eventuali impatti negativi sui soggetti coinvolti in caso di esito insoddisfacente

Questa tesi si propone di strutturare le prime fasi operative per la creazione di una *regulatory sandbox* nazionale specifica per i SAF. A partire dall' analisi qualitativa del contesto normativo e del mercato dei carburanti alternativi, l'elaborato esamina in dettaglio alcune *policy* selezionate, individuandone i rischi e relative strategie di mitigazione, oltre ai limiti e le potenzialità generati in seguito ad una loro implementazione per i diversi attori della filiera. Successivamente è stata effettuata un'analisi multicriterio (MCDA), concepita per valutare e ponderare le diverse leve economiche e regolatorie esaminate, con l'obiettivo di selezionare tra queste la soluzione più adatta da sviluppare in una *sandbox*. Sulla base dell'esito di questa valutazione, la misura proposta viene declinata in un piano d'azione che segue la cronologia stabilita dal *Regulatory Sandbox Toolkit* dell'OECD, in grado di guidare l'autorità pubblica nella sperimentazione sul campo di incentivi innovativi volti ad accelerare la decarbonizzazione del trasporto aereo e a favorire l'adozione dei carburanti sostenibili d'aviazione.

1 I Sustainable Aviation Fuels (SAF)

Il settore dell'aviazione civile si trova oggi al centro di una sfida epocale, guidata dalla sempre più urgente necessità di intervenire sui fattori che sono responsabili del riscaldamento globale. Sebbene a livello globale il settore sia responsabile di circa il 2,4% delle emissioni antropogeniche annuali di CO_2 e del 4% del riscaldamento globale [1], le emissioni derivanti dal comparto del trasporto aereo continuano costantemente a crescere dal 1990 [2]. Con la ripresa della circolazione aerea post-pandemia, l'Organizzazione per l'aviazione civile internazionale (ICAO) stima una crescita del 3,1% annuo del traffico passeggeri fino al 2050 [2] e le proiezioni elaborate dall'International Council on Clean Transportation (ICCT) in un loro attuale report indicano che, mantenendo le tendenze attuali, il contributo dell'aviazione al riscaldamento globale tra il 2025 e il 2050 potrebbe raddoppiare rispetto all'impatto che il settore ha avuto in tutta la sua storia dal 1940 a oggi [1].

Per rispondere a questa emergenza climatica, l'Unione Europea ha introdotto il pacchetto legislativo "Fit for 55" nell'ambito del *Green Deal*, mirato a ridurre le emissioni nette di gas serra di almeno il 55% entro il 2030 rispetto ai livelli registrati nel 1990 [3] per raggiungere la neutralità climatica nel 2050 [2]. Poiché le tecnologie aeronautiche dirompenti, come gli aeromobili alimentati a idrogeno o a propulsione puramente elettrica, richiederanno decenni per raggiungere la piena maturità commerciale, i carburanti sostenibili per l'aviazione (SAF) emergono ad oggi come una promettente soluzione tecnologicamente pronta e applicabile per decarbonizzare in modo significativo i voli a corto, medio e lungo raggio [2].

Nonostante l'attuale e forte spinta istituzionale derivi dalle recenti direttive climatiche, la storia e la prima adozione commerciale dei carburanti alternativi affondano le radici nel decennio scorso. Il primo vero traguardo sperimentale risale al 2008 quando grazie ad una partnership tra Virgin Atlantic, Boeing e GE Aviation è stato operato il primo volo dimostrativo al mondo di un jet commerciale (un Boeing 747-400) utilizzando una miscela contenente biocarburante [4]. L'importanza di questo volo pionieristico fu assoluta, infatti, sebbene fu utilizzata una miscela in cui il biocarburante rappresentava solo una minima percentuale, esso dimostrò per la prima volta la fattibilità tecnica dei SAF, confermando che era possibile alimentare un velivolo civile senza apportare alcuna modifica hardware ai motori o alla struttura dell'aereo.

A seguito di questo fondamentale dimostrazione di fattibilità in volo, l'industria aeronautica ha continuato a spingere i limiti ingegneristici e chimici per dimostrare la totale fungibilità di questi vettori energetici. Questo sforzo ingegneristico è culminato poi nel marzo 2021, quando una sinergia tra leader del settore come Airbus, Rolls-Royce e il Centro Aerospaziale Tedesco (DLR) ha permesso di effettuare il primo volo passeggeri commerciale alimentato al 100% con SAF utilizzando esclusivamente carburante di tipo HEFA fornito dall'azienda Neste [5].

In soli 13 anni, l'industria è passata dal collaudare modeste miscele in voli a vuoto, al dimostrare che un aereo passeggeri può operare in totale sicurezza con serbatoi riempiti unicamente con carburanti derivati da scarti sostenibili, superando le barriere di miscelazione e ponendo le basi industriali su cui si fondano le odierne normative europee. È proprio grazie a questi primi collaudi, che i SAF si sono evoluti da mera innovazione ingegneristica a vero e proprio pilastro delle strategie climatiche internazionali, capaci oggi di garantire la sopravvivenza ambientale e commerciale dell'intero ecosistema del trasporto aereo.

Alla luce di questa evoluzione, i capitoli successivi forniranno una panoramica sulle tipologie di materie prime (*feedstock*) ammesse e si esploreranno le tecnologie e i processi chimici di conversione (*pathways*) attualmente disponibili per la realizzazione dei carburanti sostenibili per l'aviazione.

1.1. Dalle biomasse agli e-fuels: mappatura dei feedstock e delle tecnologie per l'aviazione sostenibile

Per comprendere le strategie di decarbonizzazione del trasporto aereo, è necessario partire dalla definizione normativa dei nuovi vettori energetici. Secondo il Regolamento europeo *ReFuelEU Aviation* (Regolamento UE 2023/2405), i carburanti sostenibili per l'aviazione (SAF) sono definiti ufficialmente come *"carburanti per l'aviazione che comprendono carburanti liquidi, «drop-in», completamente fungibili con il carburante convenzionale per l'aviazione e compatibili con i motori aeronautici esistenti" [2].*

1.1.1 Analisi delle categorie di feedstock per la decarbonizzazione aeronautica

Sotto l'acronimo "SAF" si raggruppano principalmente due grandi sottocategorie di carburanti, distinte in base all'origine della materia prima utilizzata per produrli, di cui si riporta una schematizzazione in Figura 1.1:

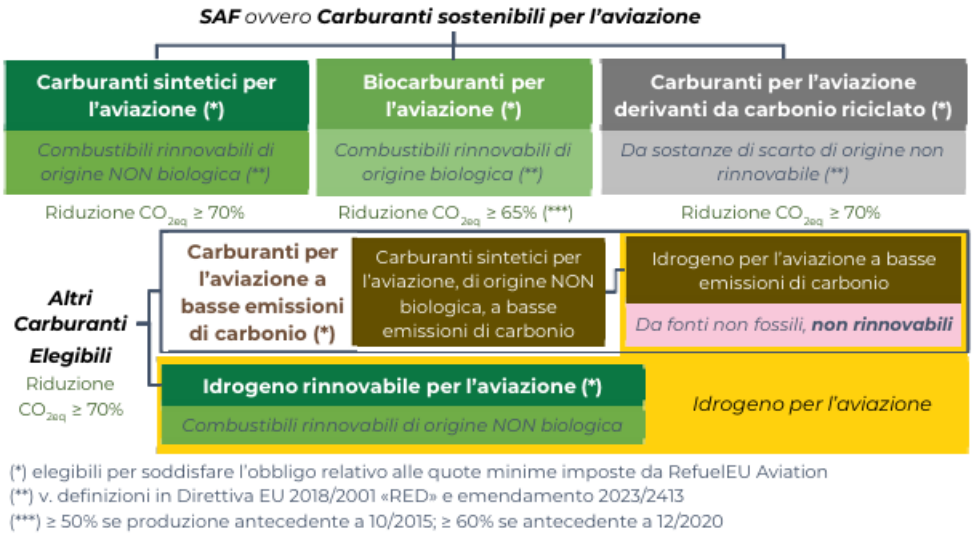


Figura 1.1- Classificazione dei carburanti alternativi secondo il Regolamento RefuelEU Aviation.

Fonte: ENAC (2024) [64].

1) ***Biojet fuels (Biocarburanti per l'aviazione):*** sono i combustibili liquidi prodotti a partire da matrici di origine biologica (biomasse o scarti organici).

2) ***Synthetic jet fuels o e-fuels (carburanti sintetici):*** classificati normativamente come "combustibili rinnovabili di origine non biologica" o RFNBO, sono carburanti inorganici in cui le molecole di idrocarburi vengono create combinando anidride carbonica (CO2) e idrogeno verde, sfruttando per il processo massicce quantità di energia elettrica rinnovabile [3].

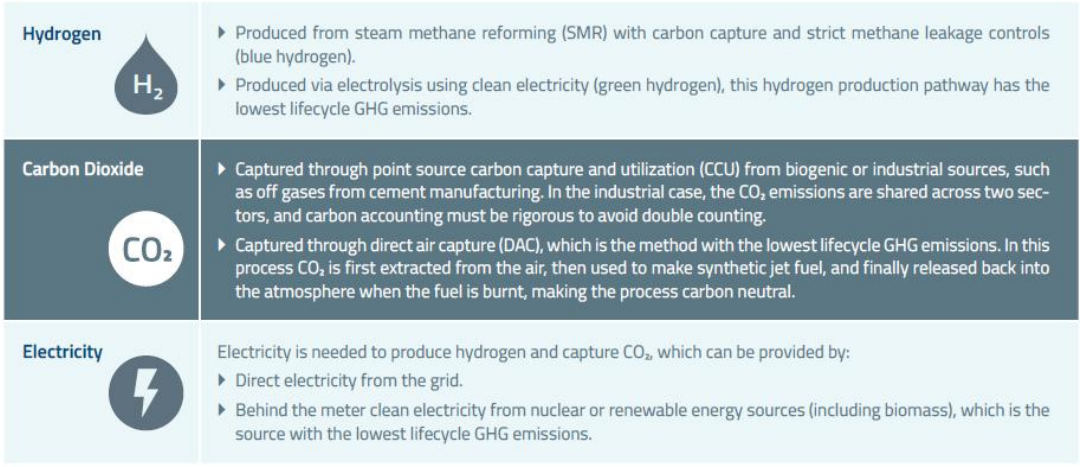


Figura 1.2 - Imput necessari per produrre sintetic jet fuels e i pathways per produrli.

Fonte: Future Cleantech Architects [3].

Mentre i carburanti sintetici dipendono dalla disponibilità di idrogeno ed energia elettrica (vedi Figura 1.2), la produzione dei *biojet fuels* dipende strettamente dalla scelta della materia prima di partenza (*feedstock*). In ambito accademico e industriale, i *feedstock* di origine biologica sono classificati in tre "generazioni" come mostrato in Figura 1.3, che ne determinano non solo l'impatto ambientale, ma anche l'ammissibilità legale:

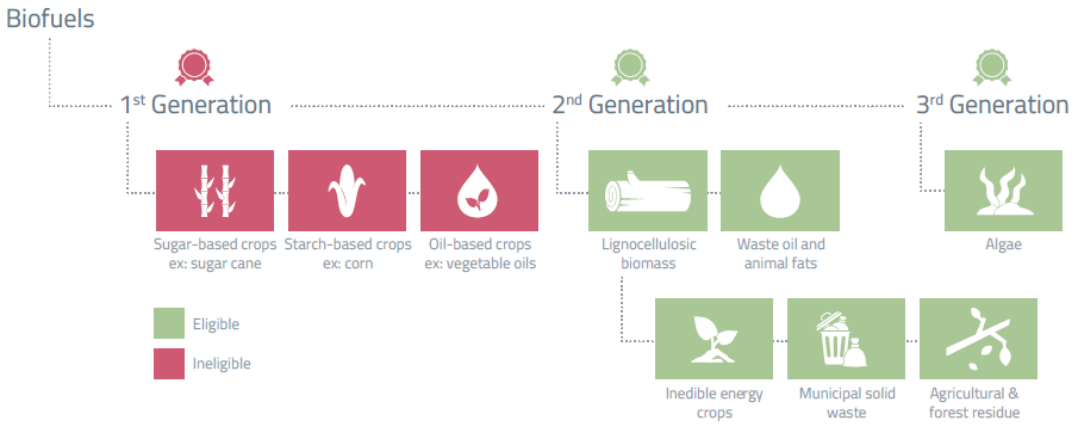


Figura 1.3- Schematizzazione delle tre generazioni di biofuels.

Fonte: FCA (2024) [3].

- **Feedstock di 1ª Generazione:** questa categoria comprende le colture alimentari e foraggere tradizionali (come ad esempio il mais, la canna da zucchero e gli oli vegetali vergini). Sebbene tecnicamente ottimi per produrre carburante, questi *feedstock* sono da evitare poiché entrano in competizione diretta con l'approvvigionamento alimentare globale [3]. Il loro utilizzo su larga scala comporterebbe infatti un alto rischio di cambiamento indiretto della destinazione d'uso dei terreni (ILUC), spingendo l'espansione agricola a scapito di foreste e zone umide [2]. Per tale

motivo, le attuali direttive europee (come la RED e il *ReFuelEU Aviation*) escludono esplicitamente i biocarburanti di prima generazione dal calcolo degli obiettivi di sostenibilità.

- **Feedstock di 2ª Generazione:** rappresentano oggi il vero fulcro della produzione di SAF sostenibili. Fanno parte di questa categoria tutte le risorse che non competono con il settore alimentare, divise tra scarti lipidici (come gli oli da cucina esausti e i grassi animali) e biomasse lignocellulosiche (come residui forestali, scarti agricoli, colture energetiche non commestibili e la frazione organica dei rifiuti solidi urbani). L'utilizzo di questi materiali garantisce una massimizzazione del risparmio di emissioni di gas serra durante l'intero ciclo di vita del carburante [3].
- **Feedstock di 3ª Generazione:** questa categoria avanzata è costituita esclusivamente dalle alghe. Queste, infatti, presentano enormi vantaggi strategici in quanto possono assorbire grandi quantità di CO_2 prodotta da poli industriali vicini [10] e, soprattutto, possono essere coltivate in vasche su terreni non agricoli utilizzando persino acqua salata o acque reflue [10]. I carburanti derivati dalle alghe sono già stati tecnicamente certificati per l'aviazione, sebbene gli alti costi dei processi di estrazione [10] ne ostacolino ancora un'immediata diffusione commerciale su larga scala.

1.1.2 Pathway: processi di conversione chimica e le certificazioni internazionali

Definita la matrice di partenza (*feedstocks*), il passaggio successivo nella filiera produttiva dei SAF è la conversione chimica della materia prima in un combustibile liquido formato da molecole complesse di idrocarburi. Date le criticità legate alla sicurezza e alle estreme condizioni operative dei motori aeronautici, non tutte le tecnologie di conversione teoricamente possibili sono autorizzate per l'uso commerciale. Nello specifico, il settore è rigorosamente normato a livello globale dagli standard tecnici redatti dall'organizzazione ASTM International (*American Society for Testing and Materials*) che viene ad oggi riconosciuta come istituzione di riferimento per la certificazione dei SAF.

Affinché un carburante alternativo possa essere utilizzato, la sua specifica filiera produttiva deve essere certificata secondo l'allegato ASTM D7566 e solo quando il carburante alternativo soddisfa questi rigorosi requisiti, può essere miscelato con il cherosene fossile tradizionale (fino a limiti prestabiliti, generalmente il 50% [6]). Una volta miscelato, il prodotto finale è certificato secondo lo standard ASTM D1655, garantendo la sua totale conformità come carburante *drop-in* (Jet A/A-1) compatibile con le infrastrutture esistenti.

Ad oggi, l'ASTM ha certificato nove processi di produzione, schematizzati di seguito in Figura 1.4 e Figura 1.5:

Seven technology pathways currently certified by ASTM to produce synthetic kerosene (SK):

Technology	Common name	D7566 Annex	Feedstock	Max % in final product
Fischer-Tropsch hydroprocessed synthesized paraffinic kerosene	FT-SPK	A1	Waste CO_2 and renewable power. Municipal solid waste. Agricultural waste / waste wood.	50
Synthesized paraffinic kerosene from hydroprocessed esters and fatty acids	HEFA SPK	A2	Vegetable oils and waste oils (e.g. used cooking oil)	50
Synthesized iso-paraffins from hydroprocessed fermented sugars	SIP	A3	Fermentable sugars	10
Synthesized kerosene with aromatics derived by alkylation of light aromatics from non petroleum sources	FT-SPK/A	A4	Waste CO_2 and renewable power. Municipal solid waste. Agricultural waste / waste wood.	50
Alcohol to jet synthetic paraffinic kerosene	ATJ-SPK	A5	Ethanol and Isobutanol	50
Synthesized kerosene from hydrothermal conversion of fatty acid esters and fatty acids	CHJ	A6	Vegetable oils and waste oils (e.g. used cooking oil)	50
Synthesized paraffinic kerosene from hydrocarbons, esters and fatty acids	HC-HEFA SPK	A7	Botryococcus braunii species of algae	10

Figura 1.4 - Sette tecnologie ad oggi certificate dall'ASTM per produrre cherosene sintetico (SK).

Fonte: Air bp.

Two technology pathways currently certified by ASTM to produce SAF through co-processing

Technology	Feedstock	Max % in final product
Co-hydro processing from Fischer-Tropsch	Waste CO_2 and renewable power. Municipal solid waste. Agricultural waste/ waste wood.	5%
Co-hydro processing from hydroprocessed esters and fatty acids	Vegetable oils and waste oils (e.g. used cooking oil)	5%

Figura 1.5 - Due tecnologie ad oggi certificate dall'ASTM per produrre SAF tramite co-processing.

Fonte: Air bp.

In particolare, tra i principali e più strategici *pathways* per la decarbonizzazione del settore vale la pena analizzare più nel dettaglio:

- **HEFA (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids):** Approvato nel 2011 con un limite di miscelazione del 50% [7], il processo HEFA è una tecnologia di natura oleochimica che sfrutta esclusivamente materie prime lipidiche di seconda generazione (come oli da cucina esausti e grassi animali). Il processo, derivato dalle tradizionali tecnologie di raffinazione petrolifera [10], prevede una fase di idrodeossigenazione (per rimuovere ossigeno, azoto e zolfo utilizzando grandi quantità di idrogeno) seguita da una fase di *hydrocracking* [3] e isomerizzazione per migliorare il comportamento del carburante alle basse temperature [10].
- **Gassificazione Fischer-Tropsch (FT-SPK)**: Approvato nel 2009 con un limite di miscelazione del 50% [6], il processo Fischer-Tropsch permette di utilizzare materie prime solide, economiche e abbondanti (biomasse lignocellulosiche, residui agricolo-forestali o la frazione non riciclabile dei rifiuti urbani). In particolare, la biomassa solida viene prima sottoposta a gassificazione ad alte temperature per produrre *syngas* (un gas di sintesi composto da idrogeno e monossido di carbonio) e successivamente il *syngas* passa nel reattore Fischer-Tropsch dove un catalizzatore ricombina le molecole per formare idrocarburi liquidi [3]

- **Alcohol-to-Jet (AtJ)**: Approvato nel 2016 con un limite di miscelazione del 50% [6], l'AtJ è un processo biochimico estremamente promettente per la sua flessibilità. Può utilizzare etanolo o isobutanolo derivanti dalla fermentazione di zuccheri, amidi, biomasse cellulosiche o persino dal riciclo di gas di scarico industriali (come le emissioni delle acciaierie) [11]. Il processo si articola in tre fasi: disidratazione dell'alcol (per formare olefine come l'etilene o il butene), oligomerizzazione (per allungare le catene di carbonio) e idrotrattamento finale per ottenere il cherosene paraffinico [22].

Accanto a queste tre filiere principali, l'ASTM riconosce altri percorsi, tra cui:

- **SIP (Synthesized Iso-Paraffins):** Approvato nel 2014 [22], utilizza lieviti geneticamente ingegnerizzati per fermentare gli zuccheri e produrre direttamente idrocarburi (farnesano) [6]. Data l'elevata purezza del composto chimico risultante, il limite massimo di miscelazione è ristretto al 10% [22].

- **Co-processing (Co-trattamento):** Consiste nell'inserire direttamente quote di oli o grassi biologici (attualmente con un limite del 5% in input [10]) all'interno delle tradizionali raffinerie di petrolio fossile [6].

Aver definito i percorsi di conversione chimica (*pathways*) e le relative certificazioni ASTM non è tuttavia sufficiente per comprendere quali di queste opzioni costituiscano ad oggi una soluzione immediatamente applicabile per il mercato aeronautico.

La valutazione della reale maturità di una filiera di produzione di biocarburanti è infatti un processo ingegneristico ed economico molto complesso. Per questo motivo, al fine di quantificare lo stato di sviluppo tecnico di una determinata tecnologia, la letteratura istituzionale fa riferimento ad un indicatore chiamato: **Technology Readiness Level (TRL).** Questo indicatore misura la maturità puramente ingegneristica dell'impianto su una scala che varia da 1, per la ricerca di base, a 9, per un sistema collaudato e dimostrato su piena scala commerciale [8] (Figura 1.6).

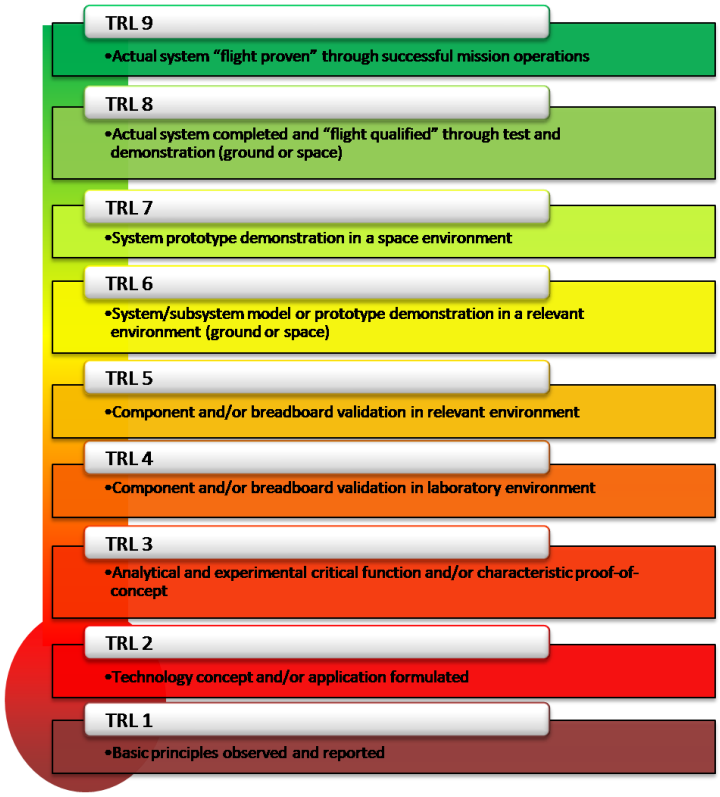


Figura 1.6 - Technology Readiness Levels.

Fonte: NASA [8].

Tuttavia, il solo TRL non esaurisce la valutazione sulla reale disponibilità di un carburante alternativo. Al di là del corretto funzionamento dei reattori chimici, la fattibilità di questi progetti è limitata da severi ostacoli collaterali: la creazione di una complessa filiera di approvvigionamento delle materie prime, gli elevati costi di impianto, i lunghi iter di certificazione e le dinamiche di mercato.

Per rispondere a questa esigenza di valutazione sistemica, la *US Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative* (CAAFI) ha sviluppato un indicatore complementare specifico per il settore aeronautico, adottato a livello internazionale anche dall'ICAO: il **Fuel Readiness Level (FRL)** [9]. Anch'esso operante su una scala da 1 a 9, l'FRL valuta lo stato di avanzamento commerciale del carburante, misurando la prontezza dell'intera catena del valore e la maturità normativa del prodotto finito come mostrato in Figura 1.7.

Fuel Readiness Level (FRL)

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++	

\+ Quantities required for risk mitigation reference
* As referenced in ASTM approved protocols
** As listed in original equipment manufacturers' manuals for aircraft and engines
++ color coding reference Phase of development green (technology phase), yellow (qualification phase), blue (deployment phase)

Figura 1.7 - Fuel Readiness Level.

Fonte: CAAFI [9].

Incrociando questi due indici è possibile scattare una fotografia esatta delle filiere certificate ad oggi, evidenziando una frammentazione tecnologica molto marcata. Come è possibile, infatti, osservare dalla Figura 1.8, la tecnologia:

Process	Common name	TRL	FRL
Hydroprocessed Esters and Fatty Acids	HEFA-SPK	9	9
Fischer-Tropsch hydroprocessed Sinthesized Paraffinic Koresene	FT-SPK	6-8	6-7
Co-hydro processing from hydroprocessed Esters and Fatty Acids	Co-processing	8-9	8-9
Alcohol to Jet Synthetic Paraffinic Koresene	AtJ-SPK	7-8	7
Power-to-Liquid	PtL	5-7	-

Figura 1.8 - TLR e FRL di alcune filiere ASTM certificate.

- **HEFA:** è attualmente l'unica tecnologia che ha raggiunto la piena maturità sia tecnologica che commerciale (TRL 9 e FRL 9). Essendo l'unico processo pienamente scalato, domina il mercato attuale, ma sconta il limite strutturale legato all'alto costo e alla scarsa reperibilità dei *feedstock* lipidici [35].
- **FT-SPK:** presenta una maturità medio-alta (TRL 6-8 e FRL 6-7). Nonostante l'enorme potenziale in termini di volumi produttivi, la diffusione commerciale del FT è oggi ostacolata da elevatissimi costi di

impianto (CAPEX) e di gestione (OPEX), legati soprattutto alla fase di pretrattamento della biomassa solida [10].

- **AtJ:** è matura e vicina alla piena commercializzazione (TRL 7-8 e FRL 7) e rappresenta il "ponte" ideale per scalare la produzione di SAF non appena i *feedstock* lipidici per l'HEFA inizieranno a scarseggiare.
- **PtL:** si posiziona attualmente a uno stadio di maturità medio-basso (TRL 5-7 e sviluppo commerciale, ovvero FRL, ancora non significativo in termini pratici [10]). Sebbene rappresenti la soluzione definitiva a lungo termine essendo svincolato dai limiti di disponibilità della biomassa, la sua diffusione è oggi pesantemente frenata da costi di produzione e di impianto (CAPEX) proibitivi (che verranno discussi a seguire). Tali barriere sono dovute all'elevato fabbisogno di energia elettrica rinnovabile per produrre idrogeno verde e alla necessità di integrare su larga scala tecnologie complesse e ancora dispendiose, come la cattura diretta della CO2 dall'aria (DAC) [11].

1.1.3 Stato attuale del mercato: capacità produttiva e gap rispetto ai target normativi

Benché il progresso tecnologico abbia portato allo sviluppo di nuove tecnologie in grado di sintetizzare carburanti a minor impatto emissivo, la fattibilità di una reale transizione ecologica nel settore dell'aviazione resta subordinata alla capacità di scalare la produzione industriale. Ad oggi, la filiera sta provando ad affrontare questa sfida attraverso una duplice strategia: investendo in impianti di bioraffinazione dedicati (*standalone)* e facendo ricorso al co-trattamento (*co-processing*) all'interno delle tradizionali raffinerie petrolifere.

La transizione delle raffinerie: differenze tra processi *Standalone* e *Co-processing*

Gli impianti *standalone* sono strutture progettate o interamente riconvertite per processare unicamente matrici sostenibili, senza mescolarle con il greggio fossile [10]. In linea con i risultati presentati nella *Net Zero Roadmaps* della IATA (2024), il principale fattore che ostacola la realizzazione di infrastrutture dedicate è l'elevato fabbisogno di capitale da investire (CAPEX) [12]. Come illustrato in Figura 1.9, tale impegno finanziario varia drasticamente in base alla tecnologia impiegata.

Secondo i modelli tecno-economici della IATA, mentre la costruzione di una bioraffineria commerciale HEFA richiede circa 450 milioni di dollari, lo sviluppo di un impianto Fischer-Tropsch per processare biomassa solida supera ampiamente il miliardo di dollari, a fronte peraltro di rese produttive inizialmente inferiori (vedi Figura 1.9) [12].

Production pathway	Representative SAF production output per plant (Mt/year)	Total distillate yield (tonne distillate produced/ tonne feedstock)	High SAF yield (tonne SAF produced/tonne distillate produced)	Corresponding average capex per plant (USD mn)
HEFA	2020: 0.44 2035: 0.44 2045: 0.44	FOGs: 0.83 Vegetable oil: 0.83	71%	2020: 452 2035: 460 2045: 474
AtJ	2020: 0.06 2035: 0.27 2045: 0.56	Ethanol: 0.60 Isobutanol: 0.75	70%	2020: 140 2035: 227 2045: 394
FT	2020: 0.03 2035: 0.08 2045: 0.13	MSW: 0.31 Forest residues: 0.18 Agricultural residues: 0.14	50%	2020: 1,094 2035: 1,013 2045: 1,478
PtL	2020: 0.03 2035: 0.08 2045: 0.16	DAC: 0.20 Waste CO_2: 0.20	50%	2020: 636 2035: 722 2045: 1,413

Figura 1.9 - Parametri di input chiave e CAPEX medio stimato per percorso di produzione di SAF.

Fonte: IATA Sustainability and Economics, ICAO (2024) SAF rules of thumb, and Brandt et al. (2021) [12].

Un esempio concreto di impianto *standalone* nel panorama europeo è offerto dalla major petrolifera OMV Petrom (Figura 1.10), che ha recentemente avviato in Romania la costruzione di una nuova unità dedicata alla produzione congiunta di SAF (per 90.000 tonnellate annue) e HVO (green diesel), a fronte di un colossale investimento di 750 milioni di euro che diventerà operativa a partire dal 2028 [15].

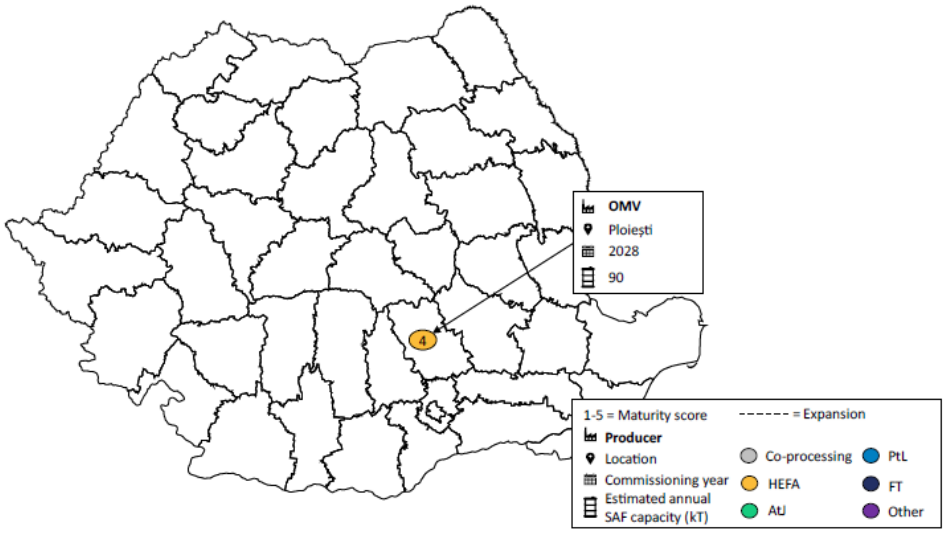


Figura 1.10 - Mappa delle SAF production facilities in Romania.

Fonte: EASA (2025) [15].

Al contrario degli impianti *standalone*, la seconda soluzione invece permette di co-alimentare piccole quote di biomasse lipidiche (attualmente limitate al 5% in volume) direttamente negli impianti di idrotrattamento delle raffinerie fossili esistenti [10]. Il *co-processing*, già utilizzato per la produzione di combustibili alternativi stradali [10], consente di azzerare i costi infrastrutturali legati all'attivazione di impianti ex-novo, ma sconta lo svantaggio di competere direttamente con le bioraffinerie dedicate per le

stesse materie prime [10] e di produrre volumi limitati rispetto alla prima categoria di impianti (vedi Figura 1.11).

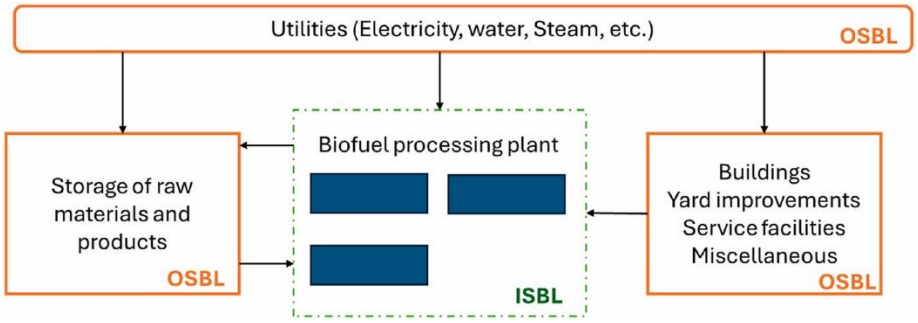


Figura 1.11 - Rappresentazione di una bioraffineria di HEFA biorefinery nello scenario di co-processing.

Fonte: Raul Perez-Mena, Paulina Echeverria-Paredes, Claudia Valderrama-Rios, Allyson Beall King, Manuel Garcia-Perez, A system dynamics tool to assess the development potential of HEFA-SAF supply chains at national and regional scales, Biomass and Bioenergy, Volume 215, 2026 [14].

Ciò nonostante, nel breve-medio termine, entrambi i sistemi sono considerati indispensabili per garantire i volumi fisici necessari a soddisfare la crescente domanda di carburante sostenibile.

I target del *ReFuelEU Aviation* e il confronto con le attuali capacità produttive

Per comprendere l'entità della sfida industriale imposta al settore aereo, è necessario partire dall'architettura normativa che ne determinerà la domanda futura.

Il Regolamento (UE) 2023/2405, noto come *ReFuelEU Aviation*, ha introdotto per la prima volta un obbligo di miscelazione crescente e vincolante per i fornitori di carburante negli aeroporti dell'Unione Europea [15]. In particolare, le quote minime di SAF da immettere in rete sono scadenzate con incrementi temporali molto rigidi, accompagnate da specifiche sotto-quote riservate esclusivamente ai carburanti sintetici (e-SAF o PtL), per favorire anche lo sviluppo commerciale e diffusione su larga scala degli *electrofuels* di origine non biologica.

L'ambizione massima di questa transizione si concretizza nei target fissati per il 2050, anno in cui viene imposto che il 70% di tutto il carburante aeronautico erogato debba essere composto da SAF [15] (vedi Figura 1.12). Per comprendere l'impegno richiesto dalla normativa, si procede a specificare la ripartizione volumetrica di questo mandato: l'Allegato I del Regolamento stabilisce infatti che il 35% dell'intera fornitura di carburante aeroportuale dovrà essere costituito rigorosamente da carburanti sintetici (*e-fuels*) [16]. Di conseguenza, il restante 35% del volume totale potrà essere coperto da biocarburanti per l'aviazione (*bio-SAF*). La somma assoluta di queste due componenti garantirà il raggiungimento del mandato globale del 70% di carburante sostenibile sull'intera fornitura, riducendo la quota residua concessa al cherosene di origine fossile a un massimo del 30%.

Se da un lato il 2050 rappresenta il traguardo finale dell'attuale programmazione della *ReFuelEU Aviation*, focalizzando l'analisi su un orizzonte temporale a noi molto più prossimo, quale il traguardo intermedio del 2030, l'impatto di tale normativa risulta già imponente. Traducendo infatti queste percentuali in volumi fisici, le proiezioni indicano che il fabbisogno di SAF nell'Unione Europea per soddisfare il mandato del 6% al 2030 raggiungerà volumi compresi tra 2,7 e 2,8 milioni di tonnellate annue [17] come mostrato in Figura 1.12:

Fuel Target	Unit	2025	2030	2035	2040	2045	2050
SAF	%	2%	6%	20%	34%	42%	70%
	ktoe	914	2,755	9,193	15,752	19,641	31,936
PtL	%	0%	1.2%[19]	5%	10%	15%	35%
	ktoe	0	468	2,298	4,633	7,015	15,968

Figura 1.12 - ReFuelEU Aviation targets, 2025-50.

Fonte: Cerulogy (2025) [17].

Tuttavia, emerge dalla consultazione dei dati raccolti nell'*Annual Technical Report 2025*, pubblicato dall'EASA (*European Union Aviation Safety Agency*), un marcato divario. Nel 2024 sono infatti state materialmente fornite agli aeroporti dell'Unione circa 193.000 tonnellate di SAF [15], pari ad appena lo 0,60% dell'intero volume di combustibili per l'aviazione, e fornite quasi esclusivamente grazie all'importazione e alla raffinazione di oli esausti (UCO) [15] (maggiori informazioni sono disponibili nella dashboard riportata in Figura 1.13).

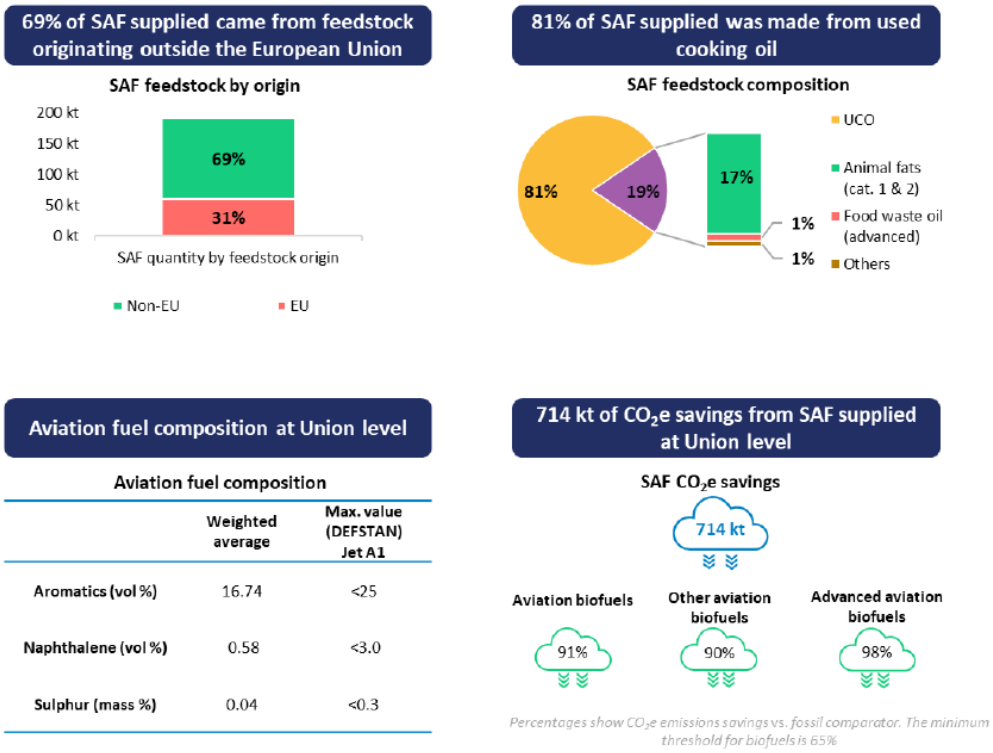


Figura 1.13 - Indicatori di performance chiave per il periodo di reporting 2024.

Fonte: EASA (2025) [15].

Tuttavia, guardando allo sviluppo degli impianti industriali europei, lo scenario a medio termine appare incoraggiante, infatti, prendendo in considerazione le bioraffinerie attualmente operative unite a quelle in fase di costruzione (scenario "Realistico"), l'EASA stima che la capacità nominale europea raggiungerà

i 3,6 milioni di tonnellate al 2030 (Figura 1.14) [15]. Di conseguenza, la capacità produttiva europea di SAF (escludendo gli *e-fuels*) risulta teoricamente sufficiente a coprire l'obbligo normativo fino alla fine del decennio.

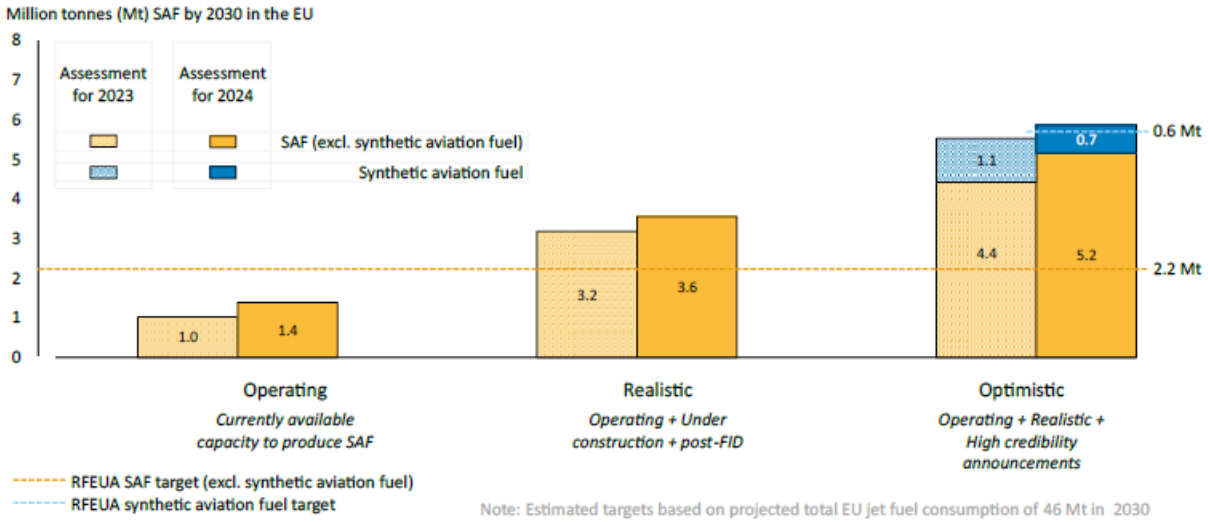


Figura 1.14 - Tre scenari relativi alla capacità produttiva in Europa.

Fonte: EASA (2025) [15].

Il vero allarme lanciato dall'EASA riguarda invece il sotto-mandato dei carburanti sintetici: ad oggi, lo sviluppo delle tecnologie *Power-to-Liquid* sconta gravi ritardi e ciò mette a rischio il raggiungimento della quota obbligatoria dell'1,2% fissata per il 2030 [17], rendendo le importazioni l'unica via di fuga [3] in assenza di investimenti in progetti e-fuels considerati ancora troppo rischiosi [36] .

Il posizionamento dell'Italia: la forza del mix tra *standalone* e *co-processing*

A livello nazionale, la domanda imposta dai mandati europei è stimata in circa 100.000 tonnellate per il 2025 e 250.000 tonnellate al 2030 (di cui circa 0,23 Mtep di bio-SAF e 0,06 Mtep di e-SAF) [10].

Per quantificare con precisione l'attuale offerta sul mercato e monitorare lo stato reale dei progetti infrastrutturali necessari a soddisfare i mandati normativi appena descritti, la comunità internazionale fa affidamento su strumenti di mappatura istituzionali in continuo aggiornamento. Tra i più rilevanti spicca l'*ICAO Tracker of SAF Facilities* (*SAF Dashboard*), un database pubblico e interattivo sviluppato dall'Organizzazione Internazionale dell'Aviazione Civile [13].

Questo strumento di monitoraggio globale censisce costantemente le bioraffinerie e gli impianti di sintesi in tutto il mondo, classificandoli in base al loro stato di avanzamento commerciale (impianti già operativi, in fase di costruzione o semplicemente annunciati), alla localizzazione geografica e ai volumi produttivi nominali previsti (vedi Figura 1.15).

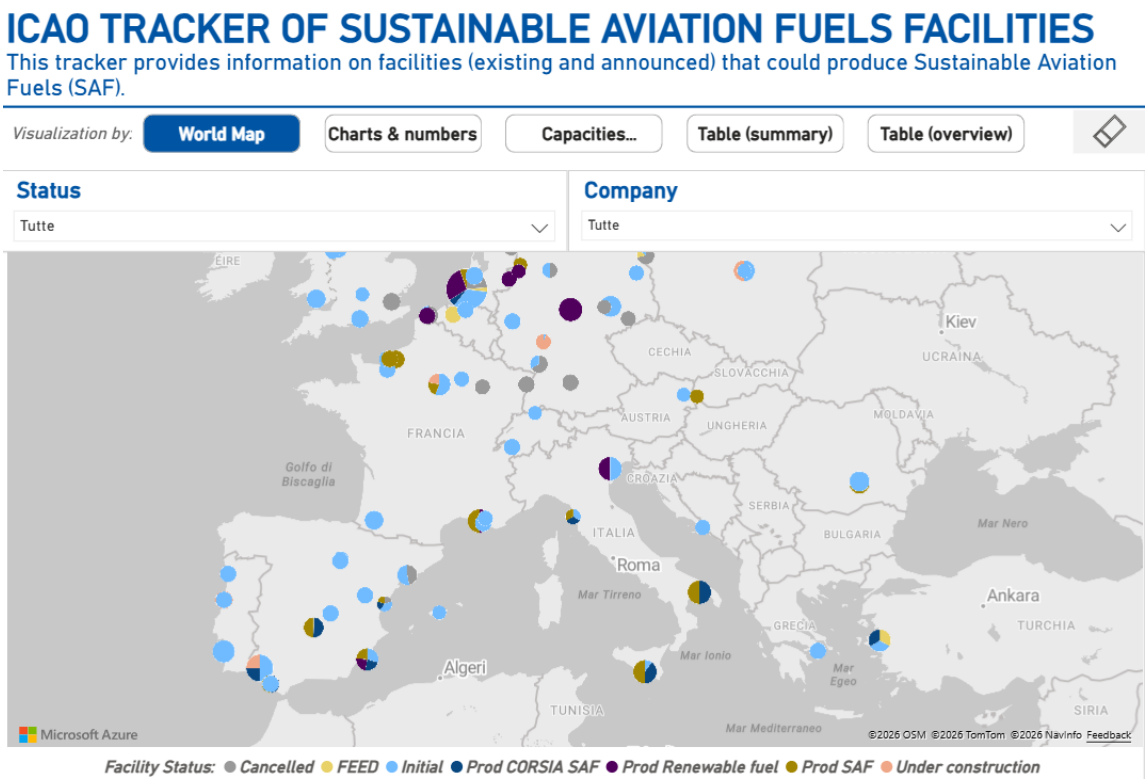


Figura 1.15 - ICAO tracker of Saf facilities dashboard.

Fonte: ICAO [13].

Questa piattaforma fornisce dunque una fotografia dinamica e in tempo reale degli investimenti industriali, evidenziando le aree geografiche più attive e il ritmo di espansione della filiera. Tuttavia, nell'analizzare i dati aggregati forniti da questo strumento, come specificato dalla stessa ICAO sul suo portale ufficiale, i numeri relativi alla capacità produttiva riportati nel *tracker* si riferiscono alla capacità totale del sito industriale [13]. Poiché le tecnologie odierne (come l'HEFA) generano un paniere di prodotti (vedi Figura 1.16), i volumi censiti includono non solo la frazione di SAF effettivamente destinata all'aviazione, ma anche gli altri combustibili rinnovabili [13] co-prodotti (come l'HVO o *Green Diesel*) destinati al trasporto stradale [10].

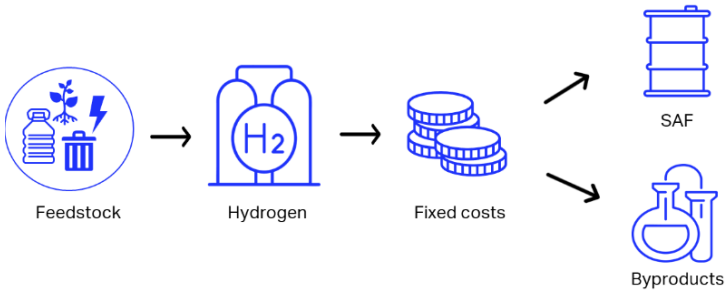


Figura 1.16 - Costi di produzione.

Fonte: IATA [18].

Nel contesto nazionale, la traduzione dei target normativi in capacità industriale reale è guidata quasi integralmente da ENI, che attraverso la sua società dedicata "Enilive" sta operando una massiccia riconversione dei propri asset tradizionali verso la bioraffinazione [19].

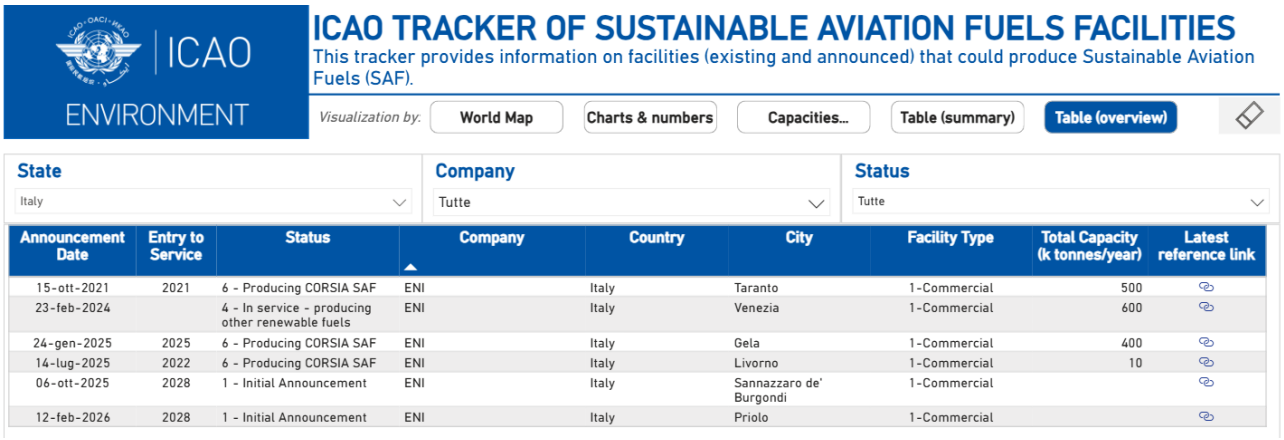
La tecnologia proprietaria alla base di questa transizione è l'*Ecofining* (sviluppata in collaborazione con Honeywell UOP), un processo di tipo HEFA che prevede un doppio trattamento, prima fisico (*degumming* e *bleaching*) e poi chimico (idrodeossigenazione e isomerizzazione), per convertire scarti, residui lipidici e oli vegetali in biocarburanti *drop-in* [19]. In particolare, la strategia industriale di Enilive prevede di innalzare l'attuale capacità totale di bioraffinazione da 1,65 milioni di tonnellate all'anno a 5 milioni di tonnellate entro il 2030, di cui oltre 2 milioni di tonnellate rappresenteranno la "opzionalità SAF" (ovvero la quota di output destinabile all'aviazione) [19].

Per raggiungere questi volumi, l'azienda sta sviluppando una rete di poli produttivi differenziati sul territorio nazionale e sostenuti da investimenti miliardari (mostrati in Figura 1.17) come:

- **Bioraffineria di Gela:** il polo siciliano rappresenta ad oggi l'infrastruttura centrale per la produzione di SAF in Italia. Nel gennaio del 2025, *Enilive* ha annunciato l'avvio ufficiale del primo impianto dedicato esclusivamente alla produzione di SAF con il 100% di componente biogenica raggiugendo una capacità nominale massima di ben 400.000 tonnellate all'anno [19]. Secondo quanto dichiarato sul sito ufficiale dell'ENI, questo volume copre da solo quasi un terzo dell'intera domanda di SAF prevista a livello europeo per il 2025 [19] a seguito dell'entrata in vigore del *ReFuelEU Aviation*.
- **Bioraffineria di Venezia (Porto Marghera):** avviata nel 2014 come primo esempio al mondo di riconversione di una raffineria tradizionale, l'area di Porto Marghera è al centro di un vasto piano di transizione energetica dal valore complessivo di oltre 900 milioni di euro [20]. Nello specifico, gli investimenti finanzieranno un massiccio potenziamento dell'impianto di "*Ecofining"*, con un incremento della capacità di trattamento da 400.000 a 600.000 tonnellate annue [20]. Questo ampliamento infrastrutturale, affiancato dalla costruzione di un nuovo impianto di *Steam Reforming* per la produzione di idrogeno da materie prime biogeniche, permetterà di estendere la gamma di prodotti in uscita, abilitando la produzione di SAF-biojet per l'aviazione [20].
- **Bioraffineria di Livorno:** il sito toscano è attualmente interessato da un progetto di conversione totale in una nuova bioraffineria, la cui entrata in funzione è programmata entro il 2026 [21]. Per supportare questa colossale operazione ingegneristica, Eni ha recentemente sottoscritto un contratto di finanziamento da 500 milioni di euro con la Banca Europea per gli Investimenti (BEI) [21]. Il progetto prevede la costruzione di tre nuovi impianti (inclusa un'unità per l'idrogeno e una di pretrattamento), al cui centro figurerà un nuovo impianto "*Ecofining"* con una capacità produttiva di 500.000 tonnellate annue [21].
- **Bioraffineria di Taranto:** l'impianto pugliese ha fatto da apripista in Italia per la validazione tecnologica, avviando già nel 2021 la produzione in co-alimentazione (*co-processing*) [15] utilizzando una quota dello 0,5% di oli esausti da cucina (UCO) [10]. Tuttavia, nel lungo periodo questo sito non sarà il fulcro dell'espansione dei volumi di SAF, favorendo la transizione verso i poli *standalone* appena citati [15].

- **Poli di Sannazzaro de' Burgundi e Priolo:** a completamento della *roadmap* industriale, *Enilive* ha in programma la conversione parziale della raffineria di Sannazzaro de' Burgundi e la realizzazione di una nuova bioraffineria *greenfield* a Priolo, quest'ultima gestita in *Joint Venture* con Q8 Italia [19].

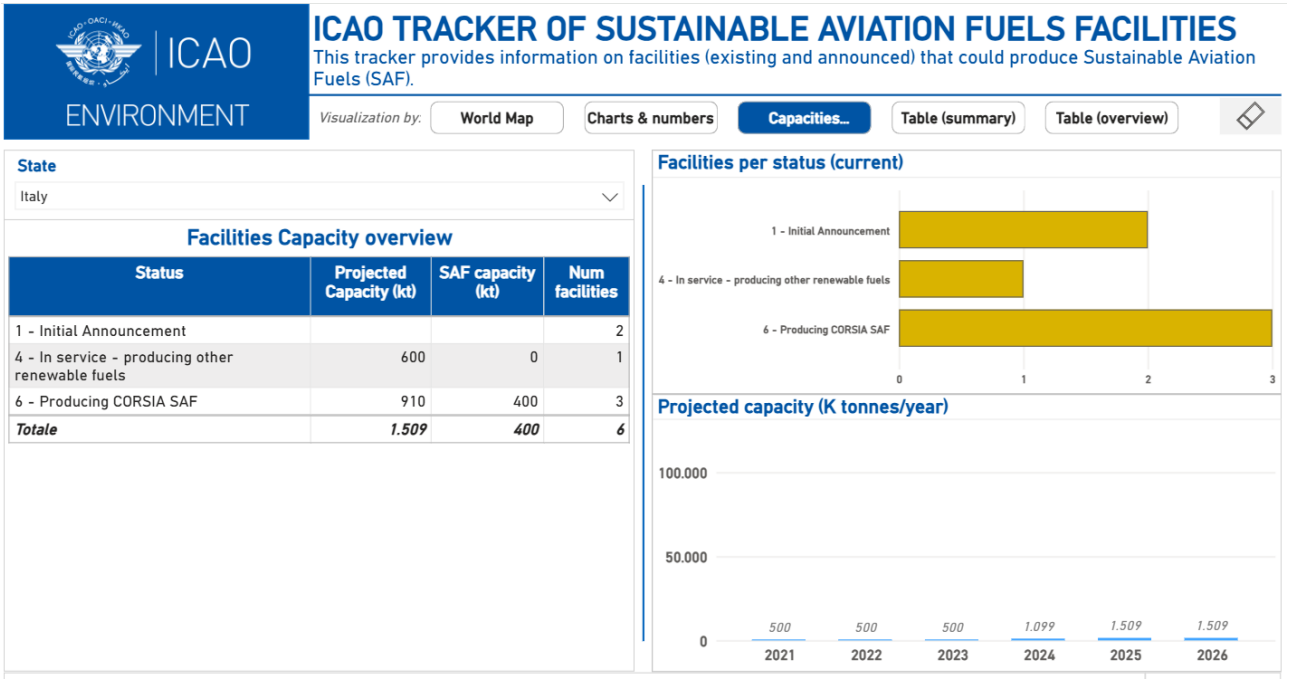
Questa considerevole capacità logistica e produttiva ha già permesso a Eni di consolidare le prime operazioni commerciali a lungo termine sul mercato. Un esempio concreto è l'accordo siglato con la compagnia aerea Ryanair, che prevede la fornitura fino a 100.000 tonnellate totali di SAF per i voli in partenza dagli scali italiani nel periodo compreso tra il 2025 e il 2030 [22].



Announcement Date	Entry to Service	Status	Company	Country	City	Facility Type	Total Capacity (k tonnes/year)	Latest reference link
15-ott-2021	2021	6 - Producing CORSIA SAF	ENI	Italy	Taranto	1-Commercial	500	
23-feb-2024		4 - In service - producing other renewable fuels	ENI	Italy	Venezia	1-Commercial	600	
24-gen-2025	2025	6 - Producing CORSIA SAF	ENI	Italy	Gela	1-Commercial	400	
14-lug-2025	2022	6 - Producing CORSIA SAF	ENI	Italy	Livorno	1-Commercial	10	
06-ott-2025	2028	1 - Initial Announcement	ENI	Italy	Sannazzaro de' Burgondi	1-Commercial		
12-feb-2026	2028	1 - Initial Announcement	ENI	Italy	Priolo	1-Commercial		

Figura 1.17 - Attività attive in Italia tracciate dalla piattaforma "ICAO tracker of sustainable aviation fuels facilities".

Fonte: ICAO [13].



Status	Projected Capacity (kt)	SAF capacity (kt)	Num facilities
1 - Initial Announcement			2
4 - In service - producing other renewable fuels	600	0	1
6 - Producing CORSIA SAF	910	400	3
Totale	***1.509***	***400***	***6***

Figura 1.18 - Capacità attuali di SAF in Italia dichiarate dalla piattaforma "ICAO tracker of sustainable aviation fuels facilities".

Fonte: ICAO [13].

In conclusione, la combinazione delle bioraffinerie e dell'integrazione fossile garantisce all'Italia una capacità installata in grado di superare agevolmente la domanda interna prevista al 2030 di 250.000 tonnellate annue. Tuttavia, il vero ostacolo, sia a livello nazionale che europeo, si presenterà subito dopo il 2030: l'aumento vertiginoso dei mandati (verso il 20% e oltre) esaurirà rapidamente le riserve disponibili di oli esausti e le capacità degli impianti attuali (mostrati in Figura 1.18**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**), richiedendo lo sviluppo massiccio di quelle tecnologie avanzate oggi frenate dagli elevati costi di impianto.

Prospettive di mercato: la necessaria diversificazione tecnologica al 2050

Secondo la *Net Zero CO2 Emission Roadmap* pubblicata dalla IATA, i diversi percorsi di conversione chimica contribuiranno all'offerta globale di SAF con ritmi marcatamente differenti nel corso dei prossimi decenni. Nel breve periodo (2023-2030), i volumi produttivi deriveranno quasi esclusivamente dalla tecnologia HEFA, sebbene la sua quota di mercato sul totale dei SAF sia destinata a flettere lievemente, passando dal 100% del 2023 all'85% stimato per il 2030, man mano che le filiere alternative inizieranno a raggiungere la fattibilità commerciale [12].

Il vero cambio di paradigma è atteso nella fase post-2030. In particolare, le previsioni della IATA indicano che la produzione derivante da processi avanzati, quali l'Alcohol-to-Jet (AtJ) e la gassificazione Fischer-Tropsch (FT), aumenterà gradualmente fino a coprire rispettivamente il 20,5% e il 30% della produzione globale di SAF entro il 2050 [12]. Di contro, la quota di mercato dell'HEFA si ridurrà drasticamente al 9,5% nello stesso orizzonte temporale [12]. Come precisa l'analisi IATA, questa flessione percentuale non implicherà un crollo dei volumi assoluti, i quali invece si stabilizzeranno intorno ai 49 milioni di tonnellate annue tra il 2045 e il 2050 come mostrato in Figura 1.19- Produzione di SAF per percorso di produzione, 2020-2050, milioni di tonnellate.Figura 1.19. Tale plateau rappresenta, di fatto, il raggiungimento del limite fisico e logistico di disponibilità dei *feedstock* lipidici a livello globale [12].

A compensare la saturazione degli oli esausti interverranno le nuove tecnologie. Si stima infatti che i volumi generati da AtJ, FT e Power-to-Liquid (PtL) supereranno quelli dell'HEFA già tra il 2040 e il 2045, traguardando rispettivamente i 105, 154 e 205 milioni di tonnellate annue entro la metà del secolo [12]. Tra questi, i carburanti puramente sintetici (PtL) registreranno la crescita più dirompente, passando dal 3,5% del totale nel 2035 al 40% nel 2050 [12].

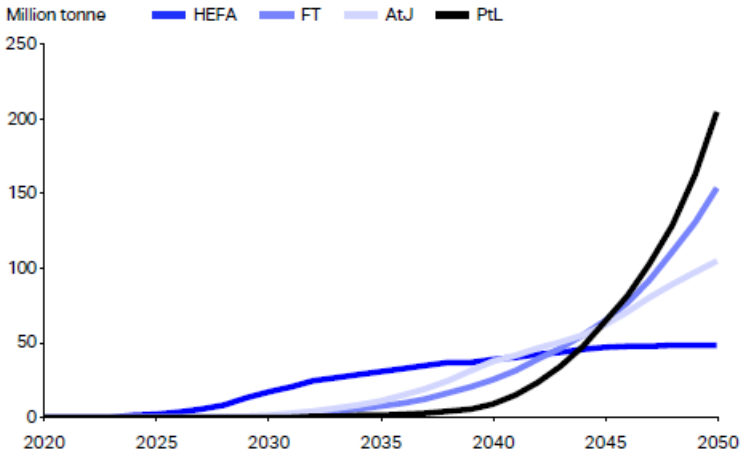


Figura 1.19- Produzione di SAF per percorso di produzione, 2020-2050, milioni di tonnellate.

Fonte: IATA Sustainability and Economics [12].

Questa espansione sarà resa possibile non appena la tecnologia raggiungerà la piena maturità commerciale, potendo contare su una base di approvvigionamento di materie prime (anidride carbonica ed energia elettrica rinnovabile) teoricamente illimitata. Pertanto, se da un lato rimane cruciale massimizzare il potenziale di produzione dell'HEFA nel breve e medio termine per innescare tempestivamente la transizione del trasporto aereo, dall'altro risulta evidente come la decarbonizzazione profonda del settore dipenderà dalla scalabilità delle tecnologie *standalone* avanzate, l'unica soluzione strutturale ai limiti dei *feedstock* attuali.

1.2 Il divario economico: costi di produzione e la necessità di strumenti di supporto

Nonostante la fattibilità tecnica delle filiere produttive e i recenti impegni dell'industria (di cui ne è una prova il piano di investimenti di ENI), la transizione energetica dell'aviazione è attualmente frenata dal profondo divario di costo (*price gap*) tra i SAF e il cherosene di origine fossile. Come espressamente riconosciuto dal legislatore europeo nel Regolamento (UE) 2023/2405 (*ReFuelEU Aviation*) e confermato dalle stime della IATA, la produzione di SAF comporta oneri nettamente superiori rispetto al Jet A1 tradizionale, rendendo questi combustibili alternativi non competitivi in un libero mercato privo di regolamentazione e sussidi.

1.2.1 Analisi dei costi di produzione: CAPEX, OPEX e feedstock

Per comprendere appieno le sfide della transizione energetica aeronautica e determinare il prezzo minimo di vendita (MSP) dei SAF, è necessario scomporre i costi industriali nelle loro tre macro-componenti fondamentali. La letteratura tecno-economica, infatti, suddivide i costi in:

- ***spese in conto capitale (CAPEX):*** necessarie per la pianificazione e l'installazione dell'infrastruttura nonché per remunerare il capitale di debito e di rischio
- ***spese operative fisse e variabili (OPEX)****:* includono i costi di manutenzione, manodopera, energia ed elettricità
- ***costo di approvvigionamento della materia prima (feedstock)***

A differenza del cherosene di origine fossile, i cui costi di estrazione e raffinazione sono ormai standardizzati, il valore economico dei SAF varia in maniera radicale a seconda della tecnologia di conversione (*pathway*) utilizzata. A partire da un'analisi incrociata dei dati forniti dal *World Economic Forum* (2025) e dalle revisioni della letteratura scientifica sono emerse delle differenze strutturali (Figura 1.20**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**) tra le diverse tecnologie, presentate di seguito:

	HEFA *	FT	AtJ	E-Jet **
CAPEX range (%)	22–40	54–81	45–75	5–20
OPEX range (%)	8–10	12–21	2–14	5–15
Feedstock range (%)	51–69	0–32	20–44	70–85

* hydrogen-associated costs are considered CAPEX- and OPEX-related costs within HEFA process. ** hydrogen-associated costs are considered feedstock-related costs within e-jet process.

Figura 1.20 - Percentuali di contribuzione del CAPEX, OPEX, e feedstock ai costi di produzione.

Fonte: Recent Advances on Alternative Aviation Fuels/Pathways: A Critical Review. Energies 2023 [11].

- **Tecnologie mature (HEFA):** l'HEFA rappresenta la tecnologia attualmente più matura, scalabile ed economica, beneficiando di un'infrastruttura di base (l'idro-processamento) già ampiamente testata per decenni nella produzione di diesel rinnovabile [11]. Come emerge in Figura 1.21, un impianto *greenfield* HEFA con una capacità di 500.000 tonnellate annue richiede un CAPEX medio stimato in circa 0,7 miliardi di dollari (corrispondenti a circa 1.500 $ per tonnellata installata) [23]. In questa filiera, il CAPEX incide solamente per il 22-40% del costo totale del carburante, mentre le spese operative (OPEX) pesano per l'8-10% (con riferimento alla Figura 1.20). Il vero *driver* economico è rappresentato dunque dal *feedstock* (oli vegetali, grassi animali e UCO), che arriva a dominare la struttura dei costi assorbendo tra il 51% e il 69% della spesa totale [11]. Questa forte dipendenza rende l'HEFA una tecnologia vulnerabile alla volatilità dei prezzi e con margini strutturalmente limitati per future riduzioni dei costi complessivi [11].

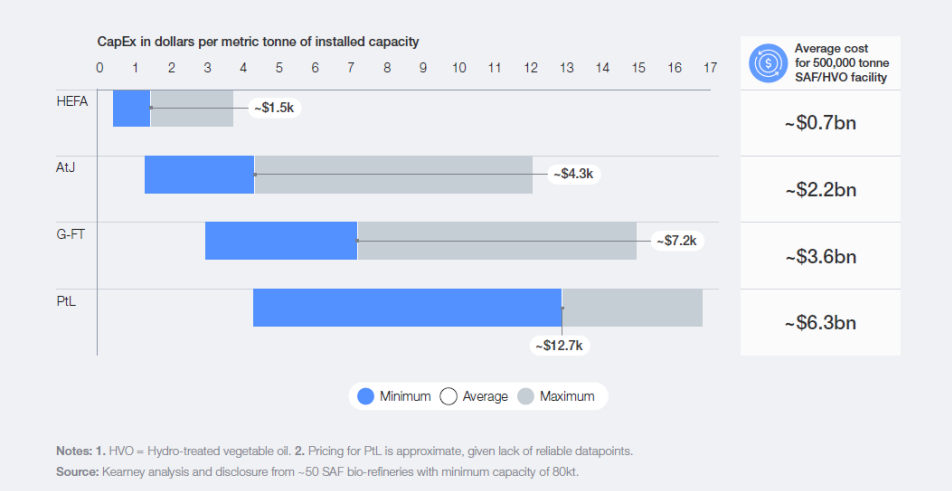


Figura 1.21 - Panoramica del CapEx per una raffineria SAF greenfield, per percorso tecnologico ($/tonnellata).

Fonte: Financing Sustainable Aviation Fuels: Case Studies and Implications for Investment, WEF (2025)[23].

- **Tecnologie avanzate (FT, AtJ, PtL, G-FT):** per le filiere in fase di prima commercializzazione (*first-of-a-kind*) o di dimostrazione, i costi di costruzione dell'infrastruttura rappresentano la barriera principale. Per la gassificazione Fischer-Tropsch (G-FT), il CAPEX rappresenta tra il 54% e l'81% dell'investimento totale, mentre per l'Alcohol-to-Jet (AtJ) si attesta tra il 45% e il 75% [11] (vedi Figura 1.20). Per quanto riguarda i carburanti puramente sintetici (PtL), sebbene in percentuale i costi siano dominati dall'acquisto di idrogeno verde ed energia (70-85%), l'esborso assoluto in CAPEX per integrare gli elettrolizzatori di grande scala risulta la più alta tra le tecnologie prese in analisi. La sua filiera dipende infatti dall'integrazione di elettricità rinnovabile, impianti di elettrolisi e sistemi di cattura della CO2, tutti elementi che risultano estremamente intensivi sia dal punto di vista energetico che economico [23].

1.2.2 Le dinamiche di mercato: minimum selling price, price gap e green premium

Per comprendere l'entità della barriera commerciale che frena l'adozione dei SAF, è necessario analizzare come i costi di produzione si traducano nel prezzo finale, attraverso l'uso di indicatori tecno-economici specifici come il "*Minimum Selling Price"* (MSP) e il concetto di "*Green Premium"*.

Il Minimum Selling Price (MSP): la base di partenza

Questo indicatore definisce il prezzo minimo al quale i fornitori possono vendere il SAF alle compagnie aeree garantendo un Valore Attuale Netto (NPV) pari a zero [12]. In altri termini, corrisponde alla soglia di prezzo esatta necessaria affinché i produttori coprano integralmente i costi di capitale dell'impianto (CAPEX), le spese operative fisse e variabili (OPEX), il costo della materia prima e le imposte, senza operare in perdita [12].

Attualmente, le stime del MSP medio, calcolati sulla base dei dati riportati in Figura 1.23 e Figura 1.24, restituiscono una gerarchia di costi ben definita che è stata fornita di seguito:

Tecnologia	MJSP
HEFA	1,21 €/litro
AtJ	1,81 €/litro
FT	1,91 €/litro
e-jets (PtL)	2,99 €/litro

Figura 1.22- MJSP di diverse tecnologie calcolati a partire dai dati forniti dalla fonte [11].

Route	Year	Feedstock	MJSP
E-jet	2022	$CO_2 + H_2$ (FT route/Methanol route)	2.10–2.30 EUR/L [71]
	2020	$CO_2 + H_2$ (FT route/Methanol route)	2.13 EUR/L [72]
	2021	$CO_2 + H_2$ (FT route)	2.77–4.89 EUR/L [73]
	2022	$CO_2 + H_2$ (FT route)	2.33–3.17 EUR/L [74]
	2021	$CO_2 + H_2$ (FT route/Methanol route)	2.25–5.00 EUR/L [75]
	2021	$CO_2 + H_2$ (FT route)	3.39 EUR/L [76]
	2019	$CO_2 + H_2$ (FT route/Methanol route)	2.94 EUR/L [77]
	2018	$CO_2 + H_2$ (Methanol route) $CO_2 + H_2$ (FT route)	2.45–3.28 EUR/L 2.60–3.37 EUR/L [78]

Figura 1.23 - MJSP calcolato per i percorsi e-jet.

Fonte: Detsios, N.; Theodoraki, S.;Maragoudaki, L.; Atsonios, K.;Grammelis, P.; Orfanoudakis, N.G. Recent Advances on Alternative Aviation Fuels/Pathways: A Critical Review. Energies 2023 [11].

Route	Year	Feedstock	MJSP
HEFA	2019	Vegetable oil	1.39 EUR/L [52]
	2016	Vegetable oil	1.84 EUR/L [53]
	2015	UCOs	1.03 EUR/L [54]
	2018	Jatropha oil Palm oil	1.60 EUR/L 0.81 EUR/L [55]
	2017	UCOs Tallow Soybean oil	0.94 EUR/L 1.10 EUR/L 1.23 EUR/L [56]
	2017	UCOs	1.29 EUR/L [57]
	2019	UCOs Soybean oil	0.88 EUR/L 1.09 EUR/L [58]
	2018	Jatropha oil Palm oil	1.44 EUR/L 1.04 EUR/L [59]
FT	2022	Municipal solid waste Agricultural residues	1.55 EUR/L 2.01 EUR/L [60]
	2022	Rice husk	2.22 EUR/L [61]
	2015	Wood chips	1.24 EUR/L [62]
	2016	Lignocellulose feedstock	1.97 EUR/L [53]
	2019	Municipal solid waste Agricultural residues	1.34 EUR/L 1.80 EUR/L [58]
	2022	Forestry residues	2.47 EUR/L [63]
	2022	Lignocellulose feedstock	2.22 EUR/L [64]
	2021	Municipal solid waste Agricultural residues Forestry residues	1.55 EUR/L 2.00 EUR/L 1.82 EUR/L [65]
	2022	Rice husk Pyrolysis bio-oil	2.22 EUR/L 2.34 EUR/L [66]
	2021	Corn stover	3.64 EUR/L [67]
AtJ	2016	Corn grain (1-G ethanol) Corn stover (2-G ethanol)	1.21 EUR/L 1.71 EUR/L [68]
	2022	Corn grain (1-G ethanol) Lignocellulose (2-G ethanol)	0.90 EUR/L 2.30 EUR/L [69]
	2016	Sugarcane (1-G ethanol) Lignocellulose (2-G ethanol) Lignocellulose (2-G ethanol)	2.02 EUR/L 1.98 EUR/L 2.75 EUR/L [53]
	2015	Forestry residues (2-G ethanol) Wheat straw (2-G ethanol)	1.98 EUR/L 2.72 EUR/L [54]
	2015	Woody biomass (2-G mixed alcohols)	1.28 EUR/L [62]
	2020	Sugarcane (1-G ethanol) Lignocellulose (2-G ethanol) Steel off-gases (2-G ethanol)	1.27 EUR/L 1.71 EUR/L 1.53 EUR/L [70]

Figura 1.24- MJSP calcolato per i percorsi HEFA, FT, AtJ.

Fonte: Detsios, N.; Theodoraki, S.;Maragoudaki, L.; Atsonios, K.;Grammelis, P.; Orfanoudakis, N.G. Recent Advances on Alternative Aviation Fuels/Pathways: A Critical Review. Energies 2023 [11].

Un'ulteriore stima dettagliata e comparativa dell'MSP dei SAF è presentata in Figura 1.25, che include un'analisi i cui risultati sono stati riportati sia in formato tabellare che grafico.

In particolare, in tabella emergono diversi parametri chiave, inclusi i costi del *feedstock* e i costi capitali (TCI), per una gamma di tecnologie di processo (GFT, ATJ, HEFA, Pyrolysis, PtL) e materie prime (MSW, residui forestali, residui agricoli, etanolo, isobutanolo, FOGs, olio vegetale, CO2 da DAC e fumi). Al di sotto della tabella, il grafico a barre fornisce un confronto visivo tra i valori di MSP risultante

(espresso in USD/L) per gli impianti pionieri (contrassegnati con il colore arancione) rispetto a quelli con scale più ampie (nth) (in blu).

Processing technology	Feedstock	Feedstock cost (USD$/tonne)	Yield*	Product slate (%) (jet:diesel:gasoline:other)	TCI (million USD$)		MSP SAF (USD$/L)	
					Nth (total distillate MLPY)	Pioneer (total distillate MLPY)	Nth	pioneer
GFT	MSW	30	0.31	40:40:20	1427.6 (500)	2944 (500)	0.9	1.63
GFT	Forest residues	125	0.18		1207.2 (300)	2488.7 (300)	1.69	3.3
GFT	Agricultural residues	110	0.14		1123.8 (220)	2316.8 (220)	2.0	3.8
ATJ	Ethanol (based on corn)	456	0.60	70:0:30	316.4 (1000)	662 (1000)	0.79	0.87
ATJ	Isobutanol	1110	0.75		649.5 (1000)	1349.8 (1258)	2.35	2.49
HEFA	FOGs	580	0.83	55:26:19	447.7 (1000)		0.8	
HEFA	Vegetable oil	810	0.83		456.4 (1000)		1.1	
Pyrolysis	Forest residues	125	0.28	44:28:16:12	384.4 (134)	794.7 (134)	1.3	2.04
Pyrolysis	Agricultural residues	110	0.27		384.4 (134)	794.7 (134)	1.33	2.08
PtL	DAC CO2	300	0.24	40:40:20	1313.2(400)	2266.1 (400)	3.60	4.02
PtL	Flue gas CO2	50	0.24		1248.7 (400)	2155.9 (400)	2.70	3.14

*(wt total distillate/wt dry feedstock, except in the case of pyrolysis which is L/kg)

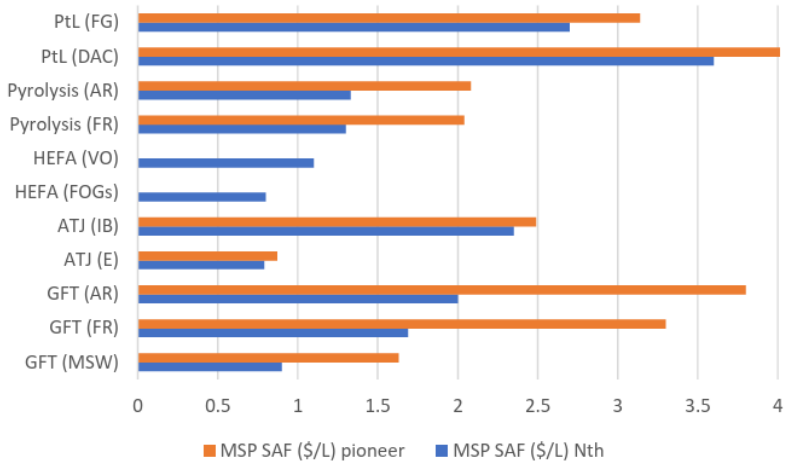


Figura 1.25 - Analisi tecno-economica di varie tecnologie e feedstock per impianti pionieri (pioneer) e di larga scala (nth).

Fonte: Progress in Commercialization of Biojet /Sustainable Aviation Fuels (SAF): Technologies and policies IEA Bioenergy Task 39 [24].

L'insostenibilità economica dell'attuale transizione appare evidente se si confrontano i costi puri di produzione (MSP) dei carburanti sostenibili con i prezzi finali del mercato fossile. Attualmente, infatti, mentre il *Minimum Selling Price* per un litro di SAF oscilla tra 1,21 € (HEFA) e 2,99 € (E-fuels) (presentati in Figura 1.22), le compagnie aeree possono acquistare il cherosene fossile a un prezzo di mercato (*Real Index Price* 2024) di circa 0,59 € al litro [15]. Tuttavia, allargando l'orizzonte di analisi, la prospettiva di mercato nel lungo periodo mostra dinamiche destinate a mutare profondamente.

Come illustrato in Figura 1.26, la *Net Zero 2050 Finance Roadmap* della IATA fornisce proiezioni temporali relative al MSP fino al 2045, ottenute mediante l'impiego di rigorosi modelli di valutazione tecno-economica (TEA) *open-access* sviluppati da Brandt et al. (2021) [12]. Nello specifico, il modello genera il prezzo di break-even (NPV=0) elaborando in input le variazioni attese nel tempo per le

dimensioni degli impianti (che scontano le future economie di scala al netto dell'inflazione), i prezzi delle materie prime e le quote di rendimento volumetrico (SAF yield) delle specifiche tecnologie di bioraffinazione [12]. A seconda del *pathway* tecnologico adottato, secondo queste stime il MSP dell'HEFA è destinato ad aumentare nel tempo, a causa dell'incremento dei costi della materia prima legato alle sempre più rigide dinamiche di domanda e offerta del mercato dei residui lipidici [12]. Al contrario, i prezzi medi degli altri tre percorsi produttivi si prevede che diminuiranno progressivamente (vedi Figura 1.26).

Secondo quanto riportato dalla IATA (2024), negli anni iniziali di prima commercializzazione, i costi per gli "impianti pionieri" (2020-2024) dei carburanti di natura non lipidica risultano notevolmente elevati: circa 6.200 USD/tonnellata per il PtL (che scenderà a 5.900 USD/t nel periodo 2025-2029, fase in cui resterà ancora pionieristico), 4.800 USD/tonnellata per la gassificazione FT e 2.300 USD/tonnellata per l'AtJ [12]. Tuttavia, una volta che queste tecnologie raggiungeranno la piena maturità commerciale, i prezzi medi di vendita subiranno un drastico abbattimento. Grazie al progressivo aumento della scala degli impianti (ad eccezione dell'HEFA) e al calo dei prezzi delle materie prime, si prevede che entro il 2045 i MSP scenderanno a circa 1.600 USD/tonnellata per l'AtJ, 1.900 USD/tonnellata per il FT e 2.200 USD/tonnellata per il PtL (come mostrato in Figura 1.26) [12].

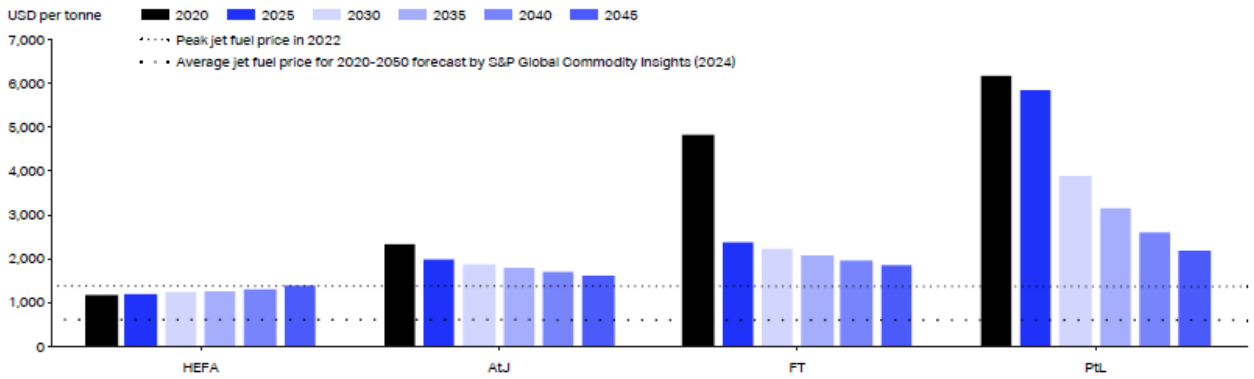


Figura 1.26 - Prezzi minimi di vendita medi (MSP) delle principali filiere di carburanti sostenibili per l'aviazione (SAF) per periodi di 5 anni nel periodo 2020-2050, espressi in USD per tonnellata.

Fonte: IATA Sustainability and Economics [12].

Nonostante queste considerevoli riduzioni nel lungo periodo, i MSP medi dei SAF (fatta eccezione per l'HEFA) continueranno a superare persino i picchi storici di prezzo raggiunti dal carburante convenzionale (CAF) nel 2022 [12]. Inoltre, se confrontati con le previsioni di prezzo medio del cherosene fossile per il periodo 2020-2050 (elaborate da S&P Global Commodity Insights), i SAF risulteranno sempre nettamente più onerosi[12].

Questo significativo divario di prezzo tra il costo di produzione dei SAF e i prezzi di mercato del carburante tradizionale rappresenta la ragione principale per cui la transizione energetica comporterà costi ingenti per il settore del trasporto aereo tra il 2023 e il 2050 a meno di interventi di supporto da parte delle autorità.

La lievitazione dei prezzi di mercato: *green premium*

Il prezzo effettivamente pagato dalle compagnie aeree, che definisce il prezzo di mercato del prodotto SAF, incorpora una serie di costi aggiuntivi che generano il cosiddetto "*Green Premium*" (o market premium). Al costo netto di produzione si sommano infatti inevitabilmente gli oneri logistici, i costi per le complesse certificazioni di sostenibilità, i costi di transazione, le spese per le infrastrutture necessarie alla miscelazione fisica del prodotto (*blending)* e i margini di profitto (*mark-up*) applicati lungo tutta la catena di approvvigionamento [18].

In *Figura 1.27* è riportato uno schema esemplificativo di transazione contabile generica di SAF, utile a fornire una rappresentazione visiva della complessità intrinseca sia alla *supply chain* sia ai relativi processi di contabilità ambientale. Questo intricato ecosistema di passaggi logistici, flussi informativi e verifiche di terze parti costituisce una delle principali determinanti che giustificano l'elevato prezzo di mercato dei nuovi carburanti.

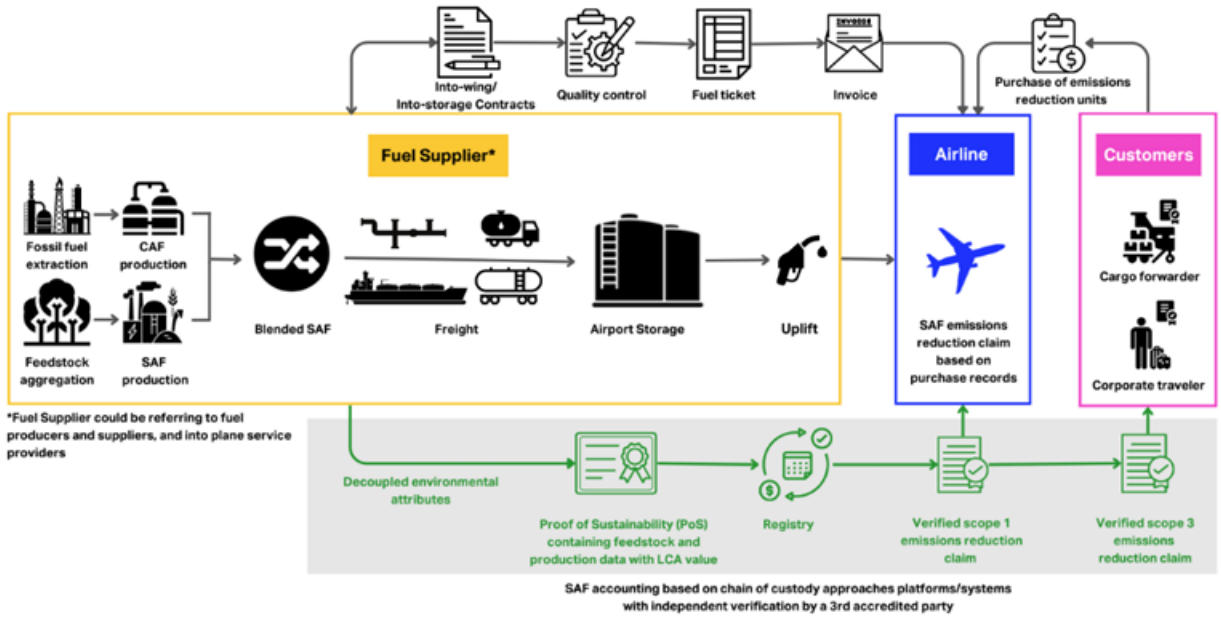


Figura 1.27 - Esempio di transazione contabile generica di SAF.

Fonte: IATA.

L'entità di questo "*Green Premium"* è lo specchio di un mercato ancora non stabilizzato, in cui i costi aggiuntivi arrivano a rappresentare una buona quota del prezzo finale come mostrato in Figura 1.28. A dimostrazione di questa dinamica, nel 2024, la sola differenza tra i costi di produzione e il prezzo di mercato in Europa ha raggiunto picchi altissimi, fino a circa 1.000 dollari per tonnellata per il SAF di tipo HEFA [18].

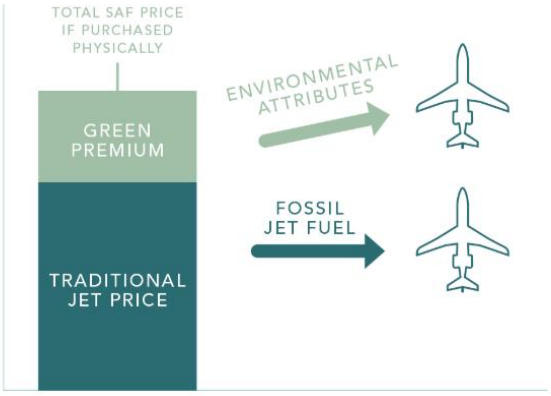


Figura 1.28 - Green premium.

Fonte: https://www.4air.aero/whitepapers/the-power-of-book-and-claim.

Il divario con il mercato fossile: *price gap*

La somma dei costi industriali (MSP) e dei ricarichi logistici (*green premium*) genera un profondo divario di prezzo (*price gap*) rispetto al cherosene di origine fossile. Analizzando i prezzi ufficiali certificati dall'Agenzia Europea per la Sicurezza Aerea (EASA) per l'anno di riferimento 2025, a fronte di un prezzo di riferimento del carburante fossile (CAF) pari a 640 €/tonnellata, la media ponderata del prezzo dei SAF sul mercato europeo si attesta a 1.925 €/tonnellata [25] (vedi Figura 1.29). Questo determina un divario di prezzo ufficiale da colmare pari a 1.285 € per ogni tonnellata acquistata, rendendo i biocarburanti per l'aviazione circa tre volte più costosi della loro controparte fossile.

La sproporzione risulta ancora più drammatica se si analizzano i carburanti puramente sintetici (PtL) in Figura 1.29 con un prezzo di riferimento certificato a 7.520 €/tonnellata, l'esborso per gli *e-fuels* risulta quasi dodici volte superiore a quello del fossile, generando un *Price Gap* di ben 6.880 € per tonnellata.

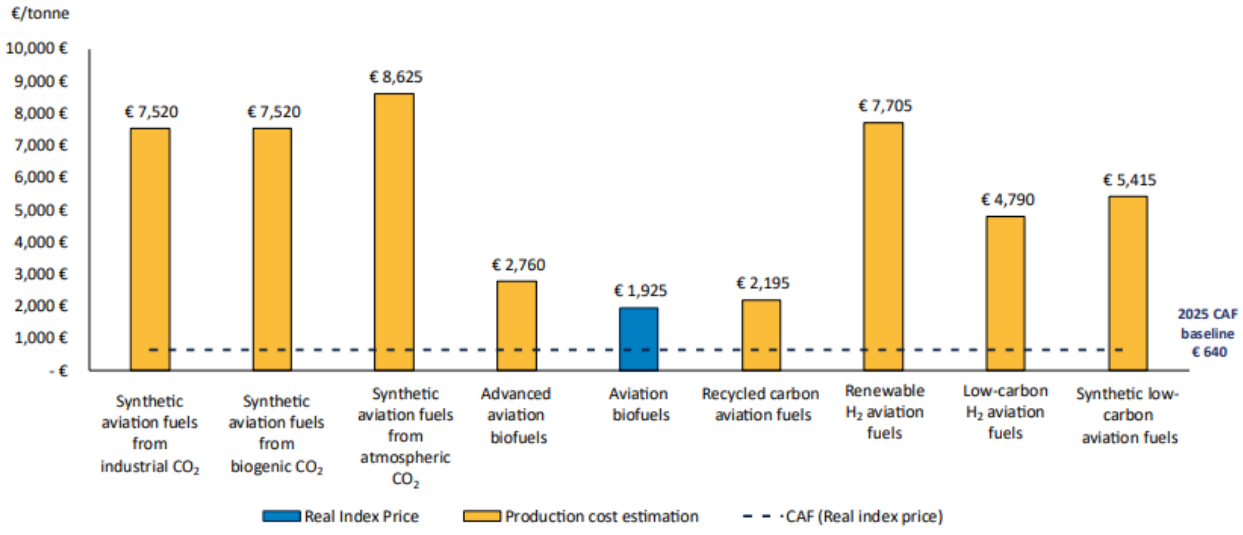


Figura 1.29 - Prezzi di riferimento 2025 per sottocategoria di carburanti aeronautici ReFuelEU Aviation.

Fonte: EASA [25].

Un esempio di modello di *pricing* viene illustrato graficamente in *Figura 1.30*:

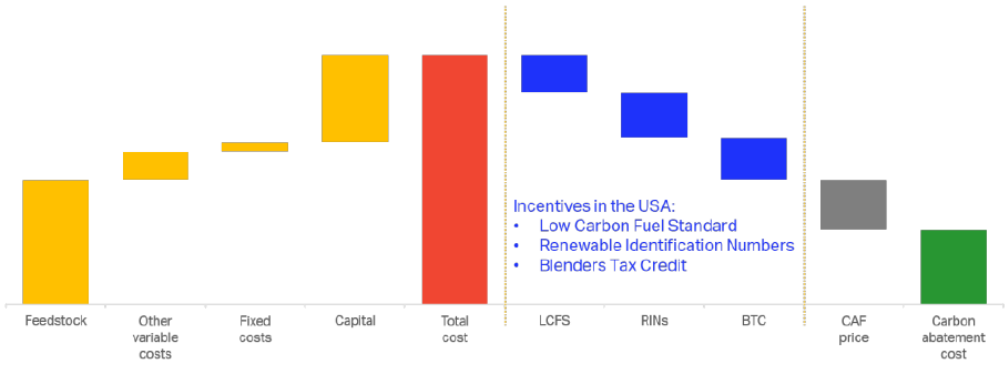


Figura 1.30- Cost-plus pricing model per HEFA (con incentive US).

Fonte: IATA [18].

Sebbene storicamente le compagnie aeree abbiano privilegiato contratti basati sul semplice ricarico rispetto all'indice del carburante fossile (*Jet fuel-plus premium*) (Figura 1.31), il modello *Cost-plus* sta diventando sempre più popolare tra i fornitori ed è oggi lo standard comune tra i grandi operatori energetici [23].

	Flat/fixed pricing	Jet fuel – plus premium	Cost-plus	Take-or-pay	Ownership
Description	Contracts where price of SAF is locked in for agreed-upon quantities, regardless of change in jet-fuel market price or cost of inputs.	Offtakers take agreed-upon quantities at the price based on the market index of fossil jet fuel (e.g. jet fuel price monitor), plus a green premium.	Offtakers take agreed-upon quantities at the price of input costs at the time of production, plus a margin.	Offtakers pay for the products on a regular basis, whether or not they actually take delivery of the products.	Offtakers take any quantity at the cost of production, in exchange for investment capital and risks (mainly through JV).
Risks shared by offtakers					
Security of supply	✓	✓	✓	✓	✓
Feedstock risk			✓	✓	✓
Technology risk				✓	✓
Construction risk					✓
Considerations	– Uncommon as risky for producer	– Most common pricing – Expected to grow more challenging as gap widens between HEFA feedstocks and Jet A indices	– Adopted by some SAF producers and common among energy players – Less risky for producers with feedstock constraints	– Very high risk for offtakers, but growing as strongest bankable signal towards financiers	– Adopted by a few large energy players – Unlikely to be adopted by airports and airlines, due to capital investment needed; but some may be able to take an equity stake in SAF plants.

Figura 1.31- Panoramica sulle diverse tipologie di contratti per i SAF.

Fonte: WEF (2025) [23].

In questo modello, il prezzo di vendita viene strutturato partendo dalla stima dei costi industriali totali. Come si evince dal grafico a cascata (Figura 1.31), il fornitore somma il costo della materia prima (*feedstock*), l'idrogeno, le spese operative (OPEX) e l'ammortamento del capitale (CAPEX), aggiungendovi il proprio margine commerciale. Da questo costo lordo di produzione vengono poi dedotti in modo trasparente gli incentivi governativi applicabili in base al paese (rappresentati dai blocchi azzurri a scendere, che nel modello statunitense mostrano la cumulabilità di crediti come BTC, RIN e LCFS).

Il valore residuo, una volta sottratto il costo di riferimento del cherosene convenzionale (CAF), costituisce l'effettivo "*green premium"* che la compagnia aerea è tenuta a corrispondere [18]. Tuttavia, l'aspetto più critico di questa struttura contrattuale risiede nell'allocazione del profilo di rischio, che risulta nettamente sbilanciato a favore del produttore. Attraverso il modello *Cost-plus*, infatti, l'intera volatilità del mercato delle materie prime (come la crescente scarsità di oli esausti per l'HEFA) e le oscillazioni del costo dell'idrogeno vengono trasferite direttamente all'acquirente [18]. Dunque nel mercato dei carburanti per l'aviazione, eventuali shock sui costi di approvvigionamento delle materie prime potrebbero esporre le compagnie aeree a notevoli rischi finanziari.

Pertanto, l'adozione di questi combustibili richiederà imperativamente regimi di sussidio e complessi strumenti finanziari per sterilizzare i costi ed evitare che l'intero "*green premium"* si scarichi sui passeggeri o distrugga la competitività delle compagnie aeree europee.

A dimostrazione di quanto finora esposto sulle dinamiche di mercato e sull'entità del "*green premium"*, risulta fondamentale quantificare il divario di prezzo attualmente esistente tra il cherosene fossile e le diverse tipologie di carburanti sostenibili. A tale scopo, si riportano i dati ufficiali pubblicati dall'Agenzia dell'Unione Europea per la Sicurezza Aerea (EASA) relativi ai prezzi di riferimento per l'anno 2024 in Tabella 1, dove per le miscele già commercializzate vengono rilevati i prezzi di mercato effettivi (*Real index pricing*), mentre per i combustibili di nuova generazione vengono elaborate rigorose stime dei costi di produzione (*Production cost estimation*), indicando un valore medio e la relativa forchetta di variazione in base alla tecnologia impiegata [15].

I dati in Tabella 1 mostrano un differenziale di costo (*Green Premium*) che varia in modo drastico: se i biocarburanti per l'aviazione registrano un sovrapprezzo di 1.351 €/t, i carburanti sintetici superano il benchmark fossile con extra-costi medi che sfiorano i 7.000 €/t, rendendo evidente la necessità di solidi meccanismi di incentivazione strutturale.

Questi dati confermano che il *Green Premium* è una barriera strutturale specialmente per le tecnologie *Power-to-Liquid* (PtL) necessarie per la produzione di e-fuels [15]. Nonostante la normativa europea punti fortemente sui carburanti sintetici a causa della loro maggiore scalabilità nel lungo termine e del minore impatto sulle risorse agricole, gli attuali costi di produzione (trainati dall'alto costo dell'idrogeno verde e della cattura diretta della CO2) rendono impossibile un'adozione su larga scala basata esclusivamente sulle forze del libero mercato. Diventa dunque evidente la necessità di implementare solidi meccanismi di incentivazione, contratti di lungo periodo (come i Contratti per Differenza) e spazi di sperimentazione normativa che possano assorbire questo rischio economico, accompagnando la filiera verso la maturità commerciale.

RFEUA Aviation Fuels Category	Market Price (€/tonne)	Production Cost Estimation (€/tonne)	Green Premium
Sustainable aviation fuels (SAF)			
Synthetic aviation fuels (weighted average)	N/A	Average 7.695 [6.820 – 9.405]	+ 6.961 €/t
Synthetic aviation fuels from industrial CO2	N/A	Average 7.695 [6.820 – 8.590]	+ 6.961 €/t
Synthetic aviation fuels from biogenic CO2	N/A	Average 7.695 [6.820 – 8.590]	+ 6.961 €/t
Synthetic aviation fuels from atmospheric CO2	N/A	Average 8.470 [7.575 – 9.405]	+ 7.736 €/t
Advanced aviation biofuels	N/A	Average 2.715 [1.915 - 3.655]	+ 1.981 €/t
Aviation biofuels	2.085	1.461	+ 1.351 €/t
Recycled carbon aviation fuels	N/A	Average 2.280 [1.940 – 2.595]	+ 1.546 €/t
Other eligible renewable and low-carbon aviation fuels			
Renewable hydrogen for aviation	N/A	Average 7.520 [6.550 – 8.515]	+ 6.786 €/t
Low-carbon hydrogen for aviation	N/A	4.655	+ 3.921 €/t
Synthetic low-carbon aviation fuels	N/A	Average 5.525 [5.180 – 5.870]	+ 4.791 €/t
Other aviation fuels			
Conventional aviation fuels (CAF)	734	N/A	0 (Benchmark)

Tabella 1- Prezzi di mercato, costi di produzione e quantificazione del Green Premium (Dati EASA 2024 [15]).

2 Il paradigma della regulatory sandbox: teoria, funzionamento e sperimentazione

Una regulatory sandbox (sandbox normativa) rappresenta un cambio di paradigma rispetto alla regolamentazione tradizionale, configurandosi come uno spazio di "*sperimentazione controllato e supervisionato"* in cui le imprese possono testare nuovi prodotti, servizi o modelli di business innovativi su scala ridotta [26]. Sotto il profilo giuridico, la sandbox non costituisce un quadro normativo permanente o una deregolamentazione totale, ma piuttosto un "*assetto sperimentale e temporaneo"* [26].

La sua natura si fonda sulla concessione di deroghe normative temporanee (*waivers*) [26] o flessibilità da parte delle autorità competenti, consentendo agli innovatori di operare senza dover soddisfare immediatamente tutti i requisiti normativi standard [26], ma rimanendo soggetti a specifiche salvaguardie e misure di supervisione. Questo approccio si traduce in "*esenzioni regolatorie per studiare se quel particolare meccanismo può funzionare su piccola scala*" [10], permettendo di valutarne l'efficacia e l'impatto prima di un'implementazione su larga scala, mitigando così i costi e i rischi di fallimento. Inoltre, la sandbox trasforma il ruolo del regolatore da un approccio puramente reattivo a uno proattivo e collaborativo, permettendogli di acquisire un'esperienza diretta sulle tecnologie emergenti per adattare tempestivamente i quadri normativi sulla base di dati empirici [26].

2.1 Evoluzione storica: dal settore Fintech all'applicazione nei settori *Hard-to-Abate* e nell'aviazione sostenibile

L'origine delle regulatory sandboxes è strettamente legata al settore finanziario (*FinTech*), nata dall'esigenza delle autorità di regolamentazione di governare innovazioni digitali dirompenti che faticavano a inserirsi nei rigidi perimetri normativi tradizionali. [27]
Il primo caso a livello globale è stato lanciato nel 2016 dalla *Financial Conduct Authority* (FCA) del Regno Unito, la quale ha istituito un ambiente controllato per permettere di testare nuovi prodotti e servizi sul mercato reale, senza ripercussioni sistemiche [27].

I risultati conseguiti durante il primo anno di operatività offrirono allora un segnale positivo del successo dell'iniziativa nel soddisfare gli obiettivi dichiarati dal *Regulatory sandbox report* pubblicato nel novembre del 2015 dalla stessa *FCA* [28].

L'impatto del progetto sul mercato, analizzato dettagliatamente nel *Lessons Learned Report* pubblicato dalla FCA nel 2017, fu infatti fin da subito tangibile: su 146 candidature ricevute per i primi due cicli di test, 50 furono accettate e 41 si tradussero in test effettivi [28]. In particolare, il 75% delle aziende ammesse al primo ciclo completarono positivamente la fase di sperimentazione e di queste circa il 90% successivamente proseguirono il percorso verso un lancio del prodotto su larga scala [28].

Un elemento centrale, emerso dall'analisi dei risultati commentati nel report rilasciato nel 2017 dalla *UK FCA,* fu l'efficienza operativa generata dall'ambiente di test. Infatti, la sperimentazione in un ambiente reale permise ai partecipanti di sfruttare le evidenze empiriche raccolte per modificare in modo strategico il proprio modello di business prima del lancio definitivo [28].

Dal punto di vista finanziario, la partecipazione al programma svolse un ruolo determinante nell'attrarre capitali. La sandbox contribuì a ridurre l'incertezza normativa che tipicamente frena gli investitori nei

settori più innovativi e permise di sbloccare, per il 40% delle imprese che avevano concluso la prima fase di test, investimenti durante o immediatamente dopo la sperimentazione [28].

L'iniziativa dimostrò la sua validità anche sotto il profilo della tutela del consumatore. Infatti, tutti i test condotti avevano rigorosamente rispettato le misure di salvaguardia previste in caso di impatti negativi dei test sul mercato [28]. L'efficacia di tali valutazioni preventive fu anche concretamente dimostrata quando un'azienda, a fronte di una scarsa adozione da parte dei consumatori, attivò con successo il proprio piano di uscita concordato in fase di progettazione, garantendo la chiusura del test senza danneggiare gli utenti coinvolti [28].

Da allora l'implementazione di questi strumenti dimostrò non solo di fornire un enorme valore nel mitigare i rischi dei nuovi prodotti e nel rafforzare la credibilità delle aziende agli occhi di consumatori e investitori, ma di contribuire a ridurre drasticamente il *time-to-market* [27] delle innovazioni, generando benefici diretti per i consumatori e ricadute positive sull'intero mercato.

Sulla scorta dei successi misurati in ambito *FinTech*, il modello della sandbox è stato poi progressivamente adottato in una pluralità di settori altamente regolamentati, quali la sanità, le telecomunicazioni, i trasporti e l'energia [27]. L'assunto di base che ha guidato questa transizione è che le innovazioni tecnologiche, in particolare quelle digitali o legate a nuovi modelli di business, spesso non si adattano ai quadri normativi esistenti [27].

Nel settore energetico, ad esempio, nel 2017 l'autorità britannica OFGEM ha lanciato il programma "*Innovation Link*", una sandbox creata per testare modelli di business inediti, come lo scambio di energia *peer-to-peer* [27] (da utente a utente). Tali modelli erano precedentemente bloccati dalle normative vigenti, le quali non consentivano ai consumatori di avere più di un fornitore di energia [27]. Parallelamente, nel settore dei trasporti, le sandbox sono state impiegate per sperimentare tecnologie sfidanti come i veicoli a guida autonoma (con test in Germania, Cina e Corea) e l'integrazione dei droni nello spazio aereo civile da parte della *Federal Aviation Administration* (FAA) statunitense [27].

Il settore dell'aviazione civile considerato "*hard-to-abate*" (difficile da decarbonizzare) [84] ha recentemente riconosciuto nella regulatory sandbox uno strumento essenziale. Come evidenziato dall'ICAO (2025), l'aviazione ha storicamente fatto affidamento su quadri sperimentali per il progresso tecnologico e per gli standard di certificazione [29] ma nonostante l'elevata maturità tecnologica di nuovi prodotti, la loro diffusione sul mercato è ancora in una fase embrionale nel dominio normativo [29].

Oggi, le sandboxes in aviazione si concentrano principalmente sui vettori energetici alternativi per traguardare la transizione ecologica. Un esempio di rilievo è la "*Hydrogen Sandbox*" della *Civil Aviation Authority* (CAA) britannica, creata per testare tecnologie che usano l'idrogeno per la sintesi del carburante [30] e che verrà presentata nel dettaglio nei capitoli successivi.

Similmente, in ambito di carburanti sostenibili (SAF o *Sustainable Aviation Fuels*), l'approccio sperimentale permetterebbe di testare l'efficacia di meccanismi logistici ed economici complessi su piccola scala.

Il passaggio delle sandboxes da esperimento di nicchia nel *FinTech* a strumento di *governance* per l'aviazione globale è stato guidato dall'osservazione di specifici vantaggi strutturali quali ad esempio:

- **Collaborazione proattiva:** trasformano il ruolo del regolatore da "controllore passivo" a partner attivo, facilitando una stretta collaborazione con gli stakeholder dell'industria e gli innovatori fin dalle fasi embrionali dello sviluppo tecnologico [29].

- **Attrazione di capitali:** riducendo l'incertezza normativa (il cosiddetto "rischio regolatorio"), le sandboxes rassicurano i mercati e facilitano l'accesso ai finanziamenti [27] per le imprese che sviluppano tecnologie complesse e costose, come quelle necessarie per la produzione di SAF o carburanti ad idrogeno.

2.1.1 Quadro normativo dei SAF: barriere regolatorie, impatto del *ReFuelEU* e il contesto istituzionale italiano

Per comprendere a fondo le barriere operative che frenano l'adozione dei *Sustainable Aviation Fuels* (SAF), è indispensabile inquadrare l'attuale panorama normativo in cui gli operatori sono chiamati a muoversi.

A livello continentale, la pietra miliare della transizione ecologica dell'aviazione è rappresentata dal Regolamento (UE) 2023/2405, noto come *ReFuelEU Aviation.* Entrato in vigore a partire dal 1° gennaio 2024 [10], questo atto normativo è parte integrante del pacchetto climatico *Fit for 55*, finalizzato ad abbattere le emissioni dell'Unione Europea di almeno il 55% entro il 2030 rispetto ai livelli del 1990 [31]. Il regolamento introduce per la prima volta obblighi legali vincolanti e armonizzati su tutto il territorio dell'Unione con l'obiettivo di integrare progressivamente i carburanti sostenibili per l'aviazione (SAF) nella miscela complessiva fino al 2050 [3]. Nel dettaglio, la norma impone ai fornitori di combustibile di garantire che tutto il carburante per l'aviazione messo a disposizione negli aeroporti dell'UE contenga quote minime crescenti di SAF (Figura 2.1): partendo dal 2% nel 2025, per arrivare al 6% nel 2030, fino a raggiungere il 70% nel 2050 [16] (con sotto-quote specifiche dedicate ai carburanti sintetici o *e-fuels*, che dovranno raggiungere il 35% nel 2050 [17]).

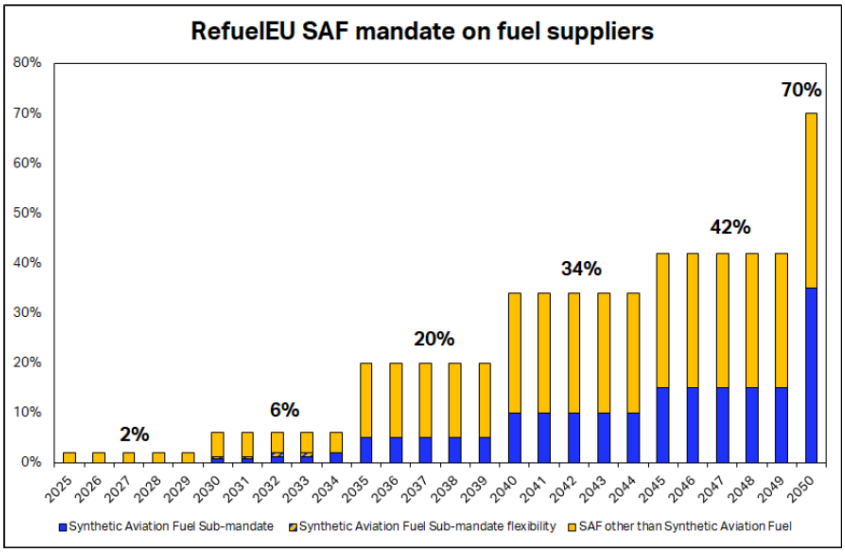


Figura 2.1 - Quote minime di carburante per aviazione tradizionale e SAF garantito dai fornitori di combustibile secondo la normativa ReFuelEU Aviation.

Fonte: IATA Sustainability and Economics, Regulation (EU)2023/2405 [15].

La situazione in Italia e negli scali nazionali

Prima dell'entrata in vigore del regolamento europeo *ReFuelEU Aviation* nel 2024, il panorama normativo italiano relativo ai carburanti sostenibili per l'aviazione si caratterizzava per un vuoto legislativo. Come evidenziato dalle mappature della *European Civil Aviation Conference* (ECAC) (Figura 2.2), a differenza di nazioni europee come Francia, Svezia e Germania, che avevano già anticipato le direttive comunitarie promulgando mandati nazionali obbligatori di miscelazione, l'Italia rientrava nel gruppo di Paesi che non avevano definito alcuna specifica misura normativa statale per imporre quote minime di SAF [10].

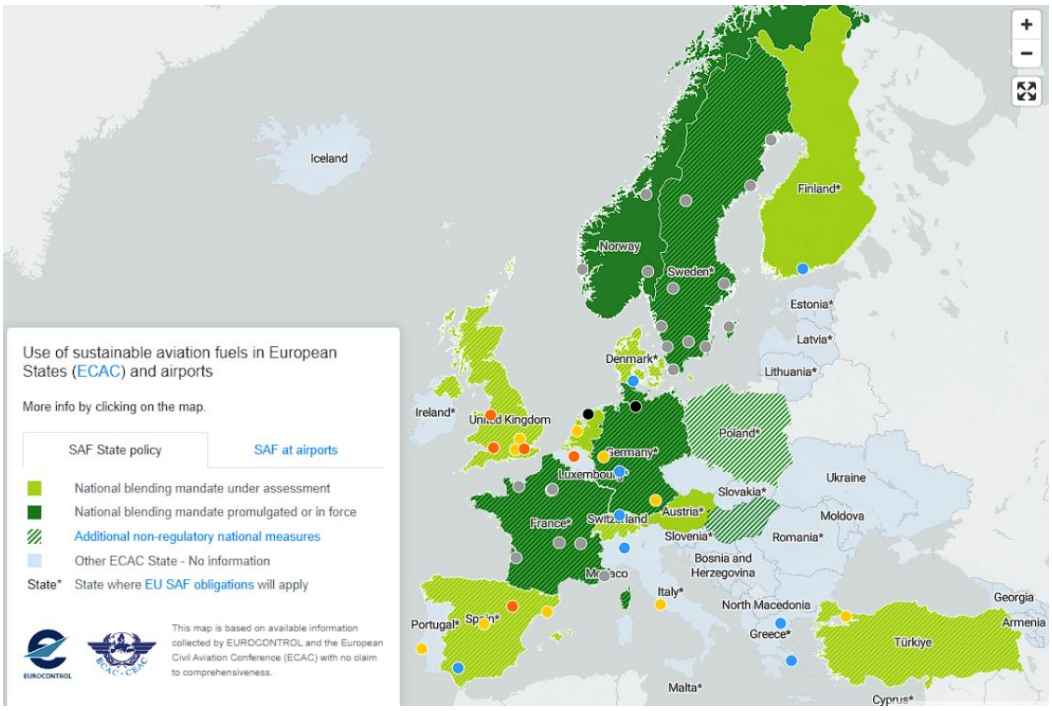


Figura 2.2 - Uso di SAF negli stati e aeroporti europei.

Fonte: Sustainable Aviation Fuels in Europe: EUROCONTROL and ECAC Cooperation | European Alternative Fuels Observatory.

Fino all'adozione del regolamento UE, la diffusione dei carburanti alternativi sul territorio nazionale è stata perciò affidata esclusivamente a iniziative su base volontaria e accordi privati tra gli operatori della filiera. Ne è un esempio la collaborazione avviata nel 2022 tra ITA Airways, ENI e Aeroporti di Roma, che ha portato all'inaugurazione delle prime tratte commerciali (come la Roma-Venezia) servite con SAF prodotto e miscelato sul territorio nazionale [32].

Questa scelta istituzionale di non procedere con una legislazione nazionale indipendente prima dell'arrivo del mandato europeo può essere compresa analizzando le dinamiche strutturali del *rulemaking* italiano descritte nel report *OECD Regulatory Policy Outlook 2025.*

Dal documento emerge, infatti, un quadro paradossale in cui il processo di approvazione di nuove leggi è ostacolato da una fortissima rigidità burocratica a cui si somma una carenza di interesse istituzionale verso la sostenibilità.

Secondo l'OECD (2025), l'iter normativo nel contesto nazionale sconta un'elevata complessità di approvazione. In Italia, infatti, la procedura di "Valutazione di Impatto della Regolamentazione" (RIA o *Regulatory Impact Assessment*) è obbligatoria per tutti i principali atti normativi e le eventuali richieste di esenzione (consentite solo per proposte a basso impatto) devono essere sottoposte a rigide procedure di revisione legale [33]. Poiché l'obiettivo della RIA è quello di aiutare i legislatori nel processo decisionale volto a selezionare l'intervento normativo in grado di generare il massimo beneficio per la società [33], l'istituzione di un mandato nazionale sui SAF avrebbe richiesto, di conseguenza, un'imponente e complessa valutazione d'impatto preventiva per misurarne le ricadute economiche, sociali e ambientali sugli scali e sui vettori nazionali.

A questa difficoltà burocratica si affianca una mancanza di interesse strutturale verso i driver ecologici. Dalla consultazione della matrice di valutazione dell'OECD al contesto di regolazione italiano, mostrata in Figura 2.3, si evince chiaramente come la rigorosa procedura di *impact assessment* durante i processi decisionali delle autorità regolatorie non si traduca in un'adeguata attenzione alla sostenibilità. La scarsa attività nell'area *Planet* fa emergere una tendenza del sistema italiano a non adottare obblighi sistematici per la valutazione degli impatti ambientali e per la stima dei costi sociali del carbonio durante la stesura e la revisione delle leggi [33].

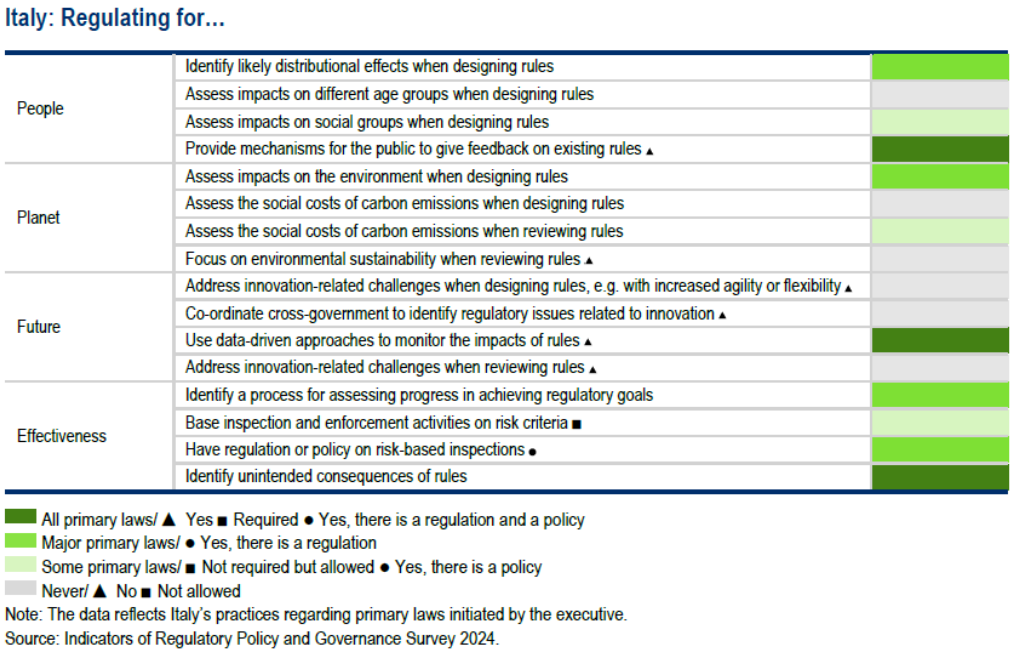


Figura 2.3 -Scorecard OECD sulle performance istituzionali dell'Italia nei settori chiave della regolamentazione.

Fonte: OECD (2025) [33].

È proprio in questo contesto di paralisi normativa nazionale che si inserisce l'intervento dell'Unione Europea**.** Il Regolamento *ReFuelEU Aviation* agisce, infatti, come elemento di rottura, bypassando le inefficienze decisionali locali e imponendo un quadro armonizzato.

Sebbene l'attuazione di tale normativa europea comporterà un impatto massiccio sulla rete infrastrutturale italiana, essa si impone con un'efficacia sovranazionale che prescinde dalle carenze di

programmazione interna. Il Regolamento, infatti, si applica direttamente a tutti gli aeroporti che superano la soglia degli 800.000 passeggeri annui o delle 100.000 tonnellate di traffico merci [31].

Analizzando i dati di traffico relativi all'anno 2025 in Figura 2.4, su 41 aeroporti commerciali italiani, ben 26 superano tale soglia, rappresentando da soli circa il 98,5% dei passeggeri totali trasportati a livello nazionale. In termini di trasporto di merci, i due hub principali di Milano Malpensa e Roma Fiumicino assorbono l'81,6% dei volumi e ricadono pienamente negli obblighi di adeguamento [34].

N.	Aeroporto	Movimenti	%	Passeggeri	%	Cargo (Tons)	%
1	Alghero	13,196	7.9	1,770,493	9.9	12.5	890.7
2	Ancona	10,831	-9.2	606,633	1.1	6,359.9	-3.2
3	Bari (^)	56,700	4.4	7,977,881	9.7	2,005.0	-13.5
4	Bergamo	104,665	-4.8	16,937,976	-2.4	24,530.9	6.8
5	Bologna	84,658	1.7	11,138,013	3.4	53,720.3	-4.7
6	Bolzano	16,645	11.5	132,958	24.7	0.0	0.0
7	Brescia (^)	10,797	-8.6	8,320	-3.9	31,411.1	-18.6
8	Brindisi (^)	24,703	-2.0	3,444,438	1.7	387.0	72.8
9	Cagliari	40,752	2.0	5,254,433	1.8	4,316.0	7.3
10	Catania	81,003	-1.9	12,369,485	0.2	5,017.0	-2.5
11	Comiso	2,340	-28.1	134,495	-48.4	0.0	0.0
12	Crotone	2,866	24.2	340,286	24.5	0.0	0.0
13	Cuneo	3,807	20.6	99,977	-5.2	0.0	0.0
14	Firenze	43,793	8.4	3,847,658	9.4	118.0	71.2
15	Foggia (^)	2,033	-12.7	69,151	11.3	0.0	0.0
16	Forlì	2,974	21.2	118,073	-11.3	0.0	0.0
17	Genova	17,272	8.3	1,576,701	18.1	236.8	-71.4
18	Grosseto	2,357	84.3	4,269	88.0	0.0	0.0
19	Lamezia Terme	25,979	9.0	3,049,594	12.4	1,588.7	-10.4
20	Lampedusa	7,858	2.1	358,089	2.5	14.1	-8.3
21	Milano Linate	122,281	3.6	11,131,764	4.5	1,772.2	-16.5
22	**Milano Malpensa**	226,321	5.5	31,385,585	8.6	763,118.5	4.3
23	Napoli	89,275	3.2	13,271,522	4.9	9,844.2	4.0
24	Olbia	44,494	5.2	4,161,572	7.2	1,391.5	5.2
25	Palermo	64,841	-0.4	9,220,905	3.4	1,534.0	6.2
26	Parma	5,062	10.9	144,560	8.1	0.0	0.0
27	Perugia	6,669	1.3	620,420	16.1	0.0	0.0
28	Pescara	15,821	15.0	1,114,691	31.5	1.0	-66.7
29	Pisa	44,892	7.3	5,977,227	7.8	12,436.8	-4.1
30	Reggio Calabria	9,992	33.9	977,984	56.7	68.6	80.2
31	Rimini	4,380	7.0	416,594	29.6	0.0	0.0
32	Roma Ciampino (^)	42,377	-0.1	3,987,517	3.3	10,114.2	-30.4
33	**Roma Fiumicino (^)**	322,744	2.3	51,306,744	4.3	273,879.9	0.8
34	Salerno	6,360	100.6	380,606	112.5	2.4	2.1
35	Taranto-Grottaglie (^)	755	-12.7	721	-28.3	3,463.0	56.3
36	Torino	47,936	8.9	5,006,169	6.7	538.3	13.6
37	Trapani	8,476	-6.0	1,007,409	-6.3	36.6	n/a
38	Treviso (^)	23,757	9.6	3,200,130	5.0	0.1	6,300.0
39	Trieste	14,523	14.2	1,651,703	25.1	18.1	-86.5
40	Venezia (^)	87,597	-1.4	11,850,336	2.2	61,950.0	0.6
41	Verona (^)	30,784	5.5	4,027,863	8.7	855.9	4.9
	TOTALI	**1,774,566**	**3.1**	**230,080,945**	**5.0**	**1,270,742.5**	**1.7**

(^) Fonte: Aeroporti2030

Figura 2.4 -Totale di passeggeri e di cargo nel 2025 relativi ai 41 aeroporti nazionali.

Fonte: Aereoporti2030.

Se da un lato il *ReFuelEU Aviation* e le direttive sulle energie rinnovabili (RED III) forniscono una traiettoria chiara, dall'altro lato la rigidità degli standard di sicurezza aeronautica (come le severissime certificazioni ASTM per omologare i nuovi carburanti) e l'assenza di un framework giuridico per testare meccanismi innovativi di mercato (come ad esempio: sconti tariffari, sistemi *book and claim*, priorità di slot aeroportuali) creano profonde barriere regolatorie.

In questo spazio di incertezza tra "ciò che la legge impone" e "ciò che la tecnologia e il mercato vorrebbero sperimentare", emerge la necessità di ricorrere alle regulatory sandboxes. Tuttavia, la creazione di uno spazio di deroga normativa non è un processo automatico [26]. Come illustrato nella Figura 2.5, prima di poter istituire una sandbox, le autorità regolatorie (in Italia, soggetti come ENAC o il Ministero dei Trasporti) devono condurre un'analisi di fattibilità giuridica, definita dall'OCSE come *Preliminary Legality Test* [26].

Questo framework diagnostico, riportato in Figura 2.5, impone al legislatore di mappare sistematicamente il perimetro giuridico attraverso la definizione e l'analisi di due situazioni:

1. **Baseline (*"AS IS"*):** il regolatore deve identificare i punti di forza ("*Strengths*") e i vincoli normativi ("*Constraints*") attuali. Si tratta di determinare con precisione cosa la legislazione vigente permette già di fare e cosa, al contrario, vieta esplicitamente (ad esempio, le normative attuali che impediscono di considerare fungibili crediti di SAF senza un collegamento fisico, o il regolamento sull'assegnazione degli slot aeroportuali) [26].
2. **Stato desiderato (*"TO BE"*):** vengono mappate le opportunità ("*Opportunities*") generate dall'innovazione e le azioni necessarie ("*Actions*") per implementarla nella sandbox. In questa fase, il regolatore valuta se possiede già l'autorità legale per concedere deroghe temporanee [26] (tramite lettere di non obiezione o esenzioni limitate [35]) o se è necessaria l'introduzione di un'apposita clausola di sperimentazione (*experimentation clause*) [35].

Il superamento del *Legality Test* è il momento critico per sbloccare l'innovazione perché permette alle istituzioni di accertarsi che la sperimentazione avvenga in modo legittimo, circoscritto e orientato all'interesse pubblico, tutelando la sicurezza dei voli e dei consumatori finali [26]. Solo dopo aver verificato le basi giuridiche della flessibilità normativa tramite questa matrice, il legislatore può procedere al design operativo della sandbox, aprendo le porte alla sperimentazione di nuovi modelli per la filiera SAF.

The Preliminary Legality Test

The Legality Test ***Enter Project Name Here***		***This test is used to determine whether the RS is an appropriate tool for addressing your regulatory challenge – cfr. Question 1. of the Sandbox Test (Annex A)***	
Regulatory diagnostics			
The baseline – AS IS situation		**Desired state – TO BE situation**	
Strengths - What is currently permitted by the legislation?	Constraints - What is currently not permitted by the legislation?	Opportunities - What needs to be changed?	Actions - How do we change it?
Possibilities and opportunities that the current legal framework provides for experimentation within the sandbox. Example; Croatian financial regulations already permit limited-time trials of new digital payment systems under certain conditions. This affordance could allow a fintech company to test a blockchain-based payment system within the sandbox without needing to undergo full regulatory approval beforehand.	Legal or regulatory limitations that might restrict what can be done in the sandbox. Example: In the same fintech scenario, if existing regulations prohibit the use of cryptocurrencies for transactions, this constraint would need to be considered and potentially addressed through temporary exemptions within the sandbox.	Identify specific regulatory or operational aspects that must be modified to make the sandbox feasible or effective. **Example**: If current regulations prohibit any form of digital-only identity verification for financial transactions, this would need to change to allow fintech companies to test new digital ID methods within the sandbox.	Propose solutions or steps to overcome the identified constraints or regulatory barriers. Example: To enable digital identity verification in the sandbox, a possible change could involve granting a temporary exemption or modifying the relevant regulation to allow a pilot program for digital ID verification, with strict oversight to ensure security and compliance during the trial period.

Figura 2.5 - Preliminary Legality Test.

Fonte: OECD (2025) [26].

2.1.2 Architettura Sanzionatoria di ReFuelEU: esenzioni, penalità e criticità di mercato

Al fine di garantire il rispetto dei target di decarbonizzazione e prevenire distorsioni della concorrenza, il regolamento *ReFuelEU Aviation* introduce un quadro giuridico rigoroso, fondato su obblighi sia per gli operatori aerei che per i fornitori di carburante [31].

Riconoscendo la complessità operativa del settore aeronautico, il legislatore europeo ha previsto un sistema di sanzioni "*efficaci, proporzionate e dissuasive*" [31] come alcune di quelle illustrate nel seguente capitolo:

Esenzioni per gli operatori aerei

Il regolamento impone agli operatori aerei, inclusi i vettori extra-UE [3], l'obbligo di rifornirsi per almeno il 90% del proprio fabbisogno annuo di carburante presso gli aeroporti dell'Unione in cui operano [31]. Questa norma è stata concepita per arginare la pratica del *fuel tankering*, ovvero l'imbarco di carburante in eccesso per evitare l'acquisto di miscele SAF più costose negli scali europei [10].

Tuttavia, sono previste delle eccezioni. In primo luogo, un operatore può scendere al di sotto della soglia del 90% qualora ciò sia strettamente necessario per ottemperare alle norme di sicurezza del volo [31], ad esempio in caso di contaminazione o carenza accertata di carburante nell'aeroporto di destinazione [16]. In tali casi, l'operatore aereo interessato è tenuto a giustificare alle autorità competenti e all'Agenzia le motivazioni dell'inadempimento degli obblighi, indicando in aggiunta le rotte interessate [16].

In secondo luogo, gli operatori possono richiedere all'autorità competente un'esenzione formale e provvisoria per specifiche rotte di corto raggio (inferiori a 850 km o 1.200 km per i collegamenti con le isole prive di reti stradali o ferroviarie) [16] facendo richiesta almeno tre mesi prima della data di applicazione prevista dell'esenzione, solo se dettagliatamente motivate [16]. Tale esenzione viene concessa esclusivamente in due scenari critici:

1. ***Difficoltà operative gravi e ricorrenti:*** quando le infrastrutture di rifornimento di un determinato aeroporto non consentono di effettuare le operazioni di *turnaround* dell'aeromobile in tempi ragionevoli [16].
2. ***Svantaggio competitivo strutturale:*** quando le caratteristiche geografiche di un aeroporto dell'Unione comportano problemi di approvvigionamento e prezzi del carburante significativamente più alti rispetto alla media degli altri scali [16].

Quadro delle penalità

Qualora non ricorrano le condizioni per le esenzioni presentate di sopra, gli Stati membri sono tenuti ad applicare severe sanzioni pecuniarie:

- ***A carico degli operatori aerei:*** l'art. 5 del regolamento stabilisce che il mancato rispetto della soglia di rifornimento del 90% comporta una multa pari ad almeno il "*doppio della cifra ottenuta moltiplicando il prezzo medio annuo per tonnellata del carburante per l'aviazione per il quantitativo annuo totale non caricato*" [16]. L'operatore è esentato solo qualora dimostri che l'inadempienza è derivata da "*circostanze eccezionali e imprevedibili, al di fuori del suo controllo*" [16].

- ***A carico dei fornitori di carburante:*** se un fornitore non immette sul mercato le quote minime richieste di SAF, è soggetto a una multa pari ad almeno il doppio della differenza di prezzo tra il cherosene fossile e il SAF, moltiplicata per la quantità di carburante mancante [16]. Multe analoghe sono previste per i fornitori che dichiarano informazioni non veritiere sulle caratteristiche e sulla provenienza delle materie prime dei SAF forniti [16].
- ***A carico dei gestori aeroportuali:*** sono previste sanzioni per i gestori che non adottano le misure necessarie per facilitare l'accesso ai SAF da parte delle compagnie aeree all'interno della propria infrastruttura [16].

Criticità del mercato

Dall'analisi della letteratura tecnica emergono due elementi di forte criticità nell'architettura sanzionatoria del regolamento *ReFuelEU:*

- ***Assenza di "Buy-Out"*** [31]**:** per il fornitore di carburante pagare la sanzione pecuniaria non permette di estinguere l'obbligo fisico ma egli sarà comunque tenuto a immettere sul mercato la quota di SAF mancante nel periodo di rendicontazione successivo, sommandola ai nuovi obblighi [16].

- ***Rischio di una spirale di inflazione:*** esperti del settore energetico, come evidenziato nel report di *Cerulogy (2025)*, avvertono che il meccanismo di calcolo delle multe nasconde un potenziale rischio inflattivo. Poiché le sanzioni per i fornitori non sono fissate a un valore assoluto, ma sono calcolate in base al prezzo di mercato del SAF pubblicato annualmente dall'EASA, si potrebbe innescare una pericolosa "circolarità instabile"[17]. In caso di scarsità di offerta di SAF, la minaccia delle multe spingerebbe al rialzo i prezzi del carburante [17]. L'aumento dei prezzi, a sua volta, alzerebbe l'importo minimo delle multe per l'anno successivo [17], creando un loop che i policy-maker faticherebbero a controllare, minando la prevedibilità necessaria per attrarre investimenti.

Per mitigare questi impatti economici, il regolamento raccomanda esplicitamente agli Stati membri di reinvestire i proventi derivanti dalle sanzioni nel settore stesso, destinandoli a progetti di ricerca sui SAF o allo sviluppo di meccanismi finanziari [31] (come i Contratti per Differenza o *CfD*) volti a colmare strutturalmente il divario di prezzo tra i combustibili sostenibili e il cherosene convenzionale.

2.1.3 Oltre la regolamentazione tradizionale: il concetto di "spazio di sperimentazione controllato"

Il quadro normativo ha il difficile compito di modificare gli incentivi di mercato imponendo vincoli, tuttavia deve farlo senza soffocare l'innovazione. Si trova dunque ad affrontare una sfida esacerbata dalla rapidità della transizione ecologica e digitale e i cui sviluppi sono complessi da prevedere.

La scelta di limitare le regulatory sandboxes a un perimetro circoscritto e ad un ambiente strettamente controllato non è un limite dello strumento, ma la sua caratteristica fondamentale. Questo approccio risponde alla complessa sfida di bilanciare la promozione dell'innovazione tecnologica con la necessità di salvaguardare la protezione dei consumatori, la stabilità del mercato e, nel caso dell'aviazione, la sicurezza operativa [26].

L'implementazione su scala ridotta risponde a quattro esigenze fondamentali:

- **Mitigazione dei rischi e prevenzione di "conseguenze generalizzate":**
  le innovazioni pioniere o i nuovi modelli di business possono introdurre nel mercato rischi difficili da stimare a priori [27]. Dunque, un'implementazione immediata su larga scala o una deregolamentazione totale esporrebbe l'intero sistema a "*conseguenze generalizzate*" immediate in caso di fallimento della tecnologia o di falle normative [26]. Al contrario, l'ambiente controllato permette di mitigare i rischi associati all'adozione di nuove misure o tecnologie non ancora mature [29].

- **Il principio di "reversibilità":**
  un vantaggio cruciale della piccola scala è la reversibilità [29]. L'inquadramento sperimentale garantisce che, qualora si materializzino dei rischi o i risultati si discostino negativamente dalle aspettative [29] (ad esempio, problemi di *safety* o *security* in ambito dei trasporti), i regolatori dispongano di meccanismi per revocare tempestivamente le attività di sperimentazione [35]. Al contrario, su larga scala, ritirare una tecnologia o una norma già diffusa in tutto il mercato sarebbe estremamente complesso e traumatico.

- **Contenimento dei costi per le imprese e lo Stato:**
  dal punto di vista economico, testare nuove normative e tecnologie su larga scala richiede investimenti infrastrutturali e di conformità (*compliance*) alle regolamentazioni enormi [35]. La sandbox invece istituisce esenzioni regolatorie su piccola scala proprio per studiare l'efficacia di meccanismi specifici sostenendo costi e rischi ridotti [10]. Questo permette alle aziende (es. i produttori di SAF) di portare le innovazioni sul mercato più rapidamente e con minori rischi finanziari [35], testandone la redditività commerciale prima di affrontare gli oneri di una diffusione di massa.

- **Apprendimento normativo basato sull'evidenza:**
  poiché non tutto può essere previsto e pianificato ex-ante a tavolino dai legislatori, la sandbox funge da simulazione per generare dati empirici nel mondo reale [26]. Inoltre, sperimentare su una porzione ridotta del mercato permette ai regolatori di osservare direttamente le implicazioni legate all'applicazione di una innovazione sul mercato [26]. Solo grazie ai dati questi ultimi possono comprendere a fondo le opportunità e le criticità, sviluppando successivamente un quadro normativo definitivo, proporzionato e ben calibrato prima dell'implementazione su vasta scala [26].

2.1.4 Il superamento del "Dilemma di Collingridge": bilanciare l'innovazione tecnologica dei SAF con la necessità di controllo preventivo

Con il termine "Dilemma di Collingridge" si descrive un paradosso fondamentale nella regolazione dei mercati caratterizzati da forte innovazione. Come documentato nel report *OECD Regulatory Policy Outlook* 2025, nella fase iniziale di sviluppo di una tecnologia, i suoi impatti futuri sono imprevedibili ed è difficile stabilire regole adeguate; tuttavia, quando la tecnologia diventa matura e diffusamente adottata, è ormai troppo radicata nel sistema economico e sociale per poter essere facilmente regolata o modificata senza ingenti danni [33].

I legislatori si trovano così di fronte a una tensione costante: da un lato la necessità di sviluppare quadri normativi obiettivi che non scoraggino l'innovazione, dall'altro la difficoltà di elaborare previsioni di mercato in un'era di rapida trasformazione [27]. Le imprese pioniere, affrontando l'incertezza normativa,

rischiano di non attrarre i capitali necessari per la scalabilità dei progetti, poiché i rischi legati a future leggi ricadono in modo sproporzionato su di loro [27]. Al contempo, modelli di business o tecnologie del tutto inedite possono generare rischi imprevisti per i consumatori, la sicurezza e la stabilità macroeconomica [27], rendendo imprescindibile un intervento di controllo preventivo da parte delle autorità.

Nel settore dell'aviazione civile, il controllo preventivo di misure che incentivino la diffusione dei carburanti sostenibili è vitale non solo per ragioni ambientali o economiche, ma per la natura intrinsecamente legata alla sicurezza (*safety*) e all'integrità operativa dei voli. I Sustainable Aviation Fuels (SAF), ad oggi, espongono il sistema a pericoli e rischi critici di cui tenere conto quali:

1. **Rischi tecnologici:**

   affinché i SAF possano essere utilizzati, devono essere "*drop-in*", ovvero sostituti perfetti del cherosene convenzionale (Jet A/A-1) e compatibili con i motori aeronautici e le infrastrutture esistenti [16]. Tuttavia, dal punto di vista chimico e tecnologico, i processi oggi più maturi presentano dei limiti. Ad esempio, i processi HEFA (idrotrattamento di esteri e acidi grassi) e Fischer-Tropsch (FT) producono un cherosene di elevata qualità ma privo della quota di composti aromatici richiesta dall'attuale standard di sicurezza [10] per garantire la tenuta delle guarnizioni dei motori [24]. La mancata presenza di questi composti chimici nei SAF ottenuti tramite le tecnologie prima citate ne rende obbligatoria la miscelazione con carburante fossile per evitare malfunzionamenti o pericoli in volo [10]. Inoltre, le filiere più avanzate (come gli *e-fuels* o *PtL*), che promettono un abbattimento quasi totale delle emissioni, si trovano a un livello di maturità tecnologica (TRL) ancora molto basso, stimato tra 5 e 7 [10].

2. **Rischi operativi:**
   la costruzione dei primi impianti su scala commerciale (*First-Of-A-Kind*) per le tecnologie avanzate comporta enormi rischi di performance. Le aziende costruttrici faticano infatti a garantire l'efficacia dei processi non ancora collaudati, esponendo gli investitori e il sistema a potenziali fallimenti tecnologici [36].
3. **Rischi ambientali:**
   se non sottoposta a rigidi controlli preventivi, la corsa ai SAF può generare impatti climatici peggiori di quelli del combustibile fossile. L'uso di biocarburanti ricavati da colture alimentari e foraggere (come l'olio di palma o di soia) incentiva il "cambiamento indiretto della destinazione d'uso dei terreni", portando alla deforestazione di aree ad alto stoccaggio di carbonio e alla perdita di biodiversità [16].
4. **Rischi di frode:**
   vi è inoltre un significativo rischio di frode legato alle materie prime di scarto. Poiché le normative (come la RED II) premiano economicamente l'uso di oli esausti e residui, si sono già verificati casi in cui oli vegetali vergini sono stati fraudolentemente etichettati come "rifiuti" per incassare gli incentivi [17]. Similmente, materie prime come la fibra di mesocarpo di palma potrebbero essere manipolate durante l'estrazione per far figurare l'olio residuo come materiale di scarto ammissibile, eludendo gli standard ambientali [37]. A livello logistico, i moderni sistemi dematerializzati per la compravendita dei SAF, come il *book and claim*, introducono l'ulteriore pericolo del doppio conteggio (*double counting*) [10] dei benefici ambientali, che deve essere rigorosamente prevenuto tramite registri centralizzati.

5. **Rischi economici e distorsioni del mercato:**
   Se da un lato l'implementazione di tecnologie SAF richiede costi in conto capitale (CAPEX) molto elevati [36] che non tutti i produttori di carburante sono pronti a sostenere, l'imposizione di obblighi di utilizzo senza un'adeguata fase di test rischia di esacerbare le distorsioni tra gli operatori aerei, favorendo fenomeni come quello del *fuel tankering* [16]. A ciò si aggiunge il rischio che regolamentazioni rigide ma premature potrebbero spingere verso la delocalizzazione della produzione in aree dove i controlli sono meno stringenti [33], penalizzando l'industria interna [10].

L'implementazione delle *Regulatory Sandboxes* potrebbe in questo modo permettere lo sviluppo tecnologico ed economico delle filiere SAF, prevenire l'immissione sul mercato di tecnologie dannose o fraudolente, e mitigare i rischi infrastrutturali prima dell'adozione su scala globale.

2.2 La ratio economica e funzionale: perché una Sandbox per i SAF?

La transizione verso i carburanti sostenibili per l'aviazione (SAF) non rappresenta esclusivamente una sfida ingegneristica, ma si configura come un complesso problema economico e normativo. Il regolamento europeo *ReFuelEU Aviation* ha introdotto ambiziosi mandati di miscelazione, ma il successo di tali politiche dipende dalla capacità del mercato di scalare la produzione in tempi rapidi.

In questo contesto, la ratio economica e funzionale di una regulatory sandbox risiede nella sua duplice natura: da un lato, funge da catalizzatore per l'innovazione riducendo le barriere all'ingresso, dall'altro, protegge l'integrità del sistema aeronautico e del mercato.

Lo strumento normativo si fonda su tre pilastri interconnessi: La gestione del rischio tecnico in un ambiente "*safe-to-fail*", la stabilizzazione finanziaria per attrarre investimenti e l'apprendimento istituzionale (*regulatory learning*).

2.2.1 Riduzione dell'incertezza normativa e tecnica: creare un ambiente *safe-to-fail* per i nuovi vettori energetici

Affinché un carburante sostenibile possa essere immediatamente utilizzato nell'aviazione commerciale, deve configurarsi come una soluzione perfettamente fungibile con il cherosene fossile e del tutto compatibile sia con i motori aeronautici che con le reti di distribuzione esistenti [16]. Tuttavia, l'integrazione di questi nuovi vettori energetici pone sfide ingegneristiche e logistiche complesse.

Ad oggi, infatti, il SAF puro (non ancora miscelato) non può essere trasportato tramite le condutture esistenti destinate al carburante convenzionale [10]. La gestione fisica di questi vettori richiede dunque lo sviluppo di una logistica parallela o l'istituzione di terminali dedicati (*Fuel Terminals*) per la miscelazione prima dell'arrivo negli scali [38]. Tuttavia allo stato attuale, la rete aeroportuale europea non è pronta per supportare una transizione così radicale su larga scala in tempi immediati.

Come evidenziato dalle analisi con gli operatori di settore, l'effettiva disponibilità di prodotto fisico e l'adeguatezza delle infrastrutture di logistica e distribuzione presso gli scali sono ancora fortemente limitate [10]. Imporre un adeguamento logistico sistemico a tutti gli aeroporti senza una preventiva fase di validazione esporrebbe l'intera rete a rischi operativi ed economici insostenibili. La dimostrazione di tecnologie innovative in contesti aeroportuali esistenti, come le iniziative promosse da recenti consorzi europei (es. i progetti *TULIPS* o *ALIGHT* [10]) permettono ad esempio di valutare la reale operatività delle nuove catene di fornitura su scala ridotta e di cui verrà fatto un accenno sulle loro attività in seguito.

Proprio alla luce di questa necessità di testare la flessibilità delle infrastrutture prima di un'adozione di massa, emerge l'importanza di un ambiente *"safe-to-fail"* che non è un'esclusiva teorica dell'aviazione, ma una necessità ingegneristica ampiamente dimostrata anche in altri settori ad alto rischio. Ad esempio, nel campo dei trasporti, l'integrazione di veicoli a guida autonoma e droni è stata possibile solo grazie a questi strumenti regolatori (come la *'K-City'* in Corea del Sud o i programmi pilota della FAA statunitense), che hanno limitato spazialmente l'area di test per scongiurare incidenti letali [27]. Similmente, nel settore sanitario, sandboxes come il *Licensing Experimentation and Adaptation Programme* (LEAP) di Singapore [27] hanno permesso di testare servizi di telemedicina [33].

Al contrario, l'assenza di una sperimentazione graduale ha storicamente portato a gravi fallimenti industriali e finanziari. Il caso più eclatante è quello del bioetanolo cellulosico negli Stati Uniti in cui, sotto la pressione di mandati normativi ambiziosi [17], la mancanza di test su scala intermedia ha impedito di identificare tempestivamente i problemi tecnici, portando al collasso degli investimenti e al mancato raggiungimento degli obiettivi di mercato [36].

Oggi, l'ICCT (2025) avverte che tentare di costruire impianti dall'elevata capacità per i SAF sintetici (*e-fuels*) senza una preventiva fase sperimentale in sandbox espone i produttori allo stesso destino (come dimostrato dalla recente interruzione del maxi-progetto europeo *FlagshipONE* [36]).

In definitiva, istituendo esenzioni regolatorie su piccola scala, la sandbox permette alle compagnie aeree e ai gestori aeroportuali di testare l'impatto reale di pratiche innovative (come voli sperimentali alimentati al 100% da SAF) all'interno di un perimetro isolato. Questo approccio garantisce che eventuali criticità tecniche o malfunzionamenti non generino un effetto domino capace di paralizzare la sicurezza e l'operatività di un intero hub aeroportuale commerciale.

2.2.2 Incentivazione agli investimenti: come la stabilità normativa temporanea attrae capitali privati nel settore biocarburanti ed e-fuels

L'approvazione del Regolamento Europeo *ReFuelEU Aviation* ha tracciato una rotta chiara per la decarbonizzazione del settore aereo, imponendo quote crescenti di miscelazione di carburanti sostenibili (dal 2% nel 2025 fino al 70% nel 2050, con sotto-quote specifiche per gli *e-fuels* [16]). Tuttavia, per soddisfare tale domanda, è necessaria la costruzione di un'imponente e inedita capacità produttiva industriale.

Se le tecnologie oggi più mature vedono i grandi attori tradizionali del settore petrolifero convertire le proprie bioraffinerie esistenti, come accennato nel capitolo precedente riportando il caso ENI [39], come evidenziato dal recente studio condotto per la Commissione Europea (*"Development of outlook for the necessary means to build industrial capacity for drop-in advanced biofuels"*) lo sviluppo di questi vettori pionieristici è spesso guidato anche da altri *players* minori, i quali si scontrano con barriere all'ingresso legate al reperimento dei capitali [40].

A fronte di un simile fabbisogno di capitali, le aziende sviluppatrici si trovano intrappolate in quello che il report definisce il paradosso "dell'uovo e della gallina" [40]. Da un lato, gli istituti di credito e i fondi infrastrutturali rifiutano di concedere finanziamenti tramite debito (*project financing*) per tecnologie *First-Of-A-Kind* (FOAK) se non supportate da un impianto di riferimento già funzionante su scala commerciale, a causa dell'altissimo rischio tecnologico percepito [40]. Dall'altro lato, le imprese non

dispongono della liquidità necessaria per costruire il primo impianto su scala reale senza aver prima sbloccato l'accesso al credito bancario [40].

A questo stallo tecnologico si somma l'incertezza che le compagnie aeree provano nel firmare contratti di acquisto vincolanti a lungo termine per volumi di SAF che costano da 3 a 6 volte in più rispetto al cherosene fossile [24]. Infatti, l'elevato costo di produzione dei SAF giustificherebbe l'assenza di una domanda volontaria garantita e l'incertezza sui ricavi futuri, impedendo in questo modo la "bancabilità" dei progetti ad essi correlati [23].

La combinazione di questi fattori ha già causato l'interruzione di iniziative di alto profilo (come il progetto europeo *FlagshipONE*) o al ritiro di grandi major da progetti come *HySkies* [36]. Quest'ultimo, nonostante un finanziamento europeo iniziale di 80 milioni di euro, ha subito una battuta d'arresto significativa nel 2024, vanificando l'obiettivo originario di produrre 82.000 tonnellate annuali di SAF [17].

Data l'impossibilità per le singole imprese di sostenere integralmente il rischio finanziario connesso alla scalabilità tecnologica, la sandbox fornirebbe ai legislatori un ambiente controllato per calibrare gli strumenti di incentivazione necessari alla diffusione di questi nuovi vettori energetici. Parallelamente, la garanzia di operare entro un perimetro normativo ed economico stabile ridurrebbe sensibilmente l'esposizione delle aziende al rischio di fallimento. La validazione empirica e supervisionata, tipica della fase di testing delle sandboxes, contribuirebbe in questo modo a rassicurare gli istituti di credito e i detentori di capitali, attenuando il profilo di rischio percepito dell'investimento. Tale mitigazione risulterebbe determinante per superare il paradosso precedentemente analizzato, favorendo di fatto l'afflusso dei capitali privati indispensabili per l'effettiva industrializzazione della filiera SAF.

2.2.3 Il ruolo del "Regulatory Learning": acquisire evidenze empiriche per l'aggiornamento dei requisiti di certificazione

Altro ostacolo critico alla commercializzazione è rappresentato dall'iter di certificazione tecnica. Mentre i carburanti convenzionali seguono lo standard ASTM D1655, ogni nuovo percorso di produzione SAF deve superare un lungo e rigoroso processo di approvazione definito dallo standard ASTM D4054 prima di essere inserito nell'allegato ASTM D7566 [41]. Questo processo richiede la produzione di ingenti quantità di carburante campione e severi test sui motori, rappresentando una barriera all'ingresso insormontabile per molte start-up e produttori emergenti [6].

In quest'ottica, la sandbox opererebbe in stretta sinergia con il modello della "*Clearinghouse*" [10] (struttura di supporto per l'approvazione dei carburanti), un'iniziativa nata negli Stati Uniti con la FAA (Federal Aviation Administration) e attualmente in fase di sperimentazione pilota anche in Europa (*EU SAF Clearing House*) [7] e che verrà approfondita nei capitoli successivi.

All'interno della sandbox, le imprese sarebbero supportate nella conduzione dei test e nella validazione dei nuovi carburanti. Dunque fungerebbe da generatore vitale di dati empirici: raccogliendo informazioni reali sulle prestazioni del carburante, sulle emissioni e sull'usura dei componenti, fornirebbe ad enti come ASTM (*American Society for Testing and Materials*) o EASA (*European Union Aviation Safety Agency)* le evidenze ingegneristiche necessarie per certificare nuovi processi produttivi o per autorizzare l'innalzamento dei limiti di miscelazione oltre l'attuale 50%, riducendo drasticamente i tempi di commercializzazione (*time-to-market*) nella massima sicurezza operativa.

2.3 L'Architettura del Processo: fasi operative e procedure di costruzione

Secondo le linee guida definite dal *Regulatory Sandbox Toolkit* dell'OECD, la costruzione e la gestione di una sandbox si articolano in tre macro-fasi fondamentali: la pianificazione, l'esecuzione e la chiusura con relativa valutazione [26] come mostrato in Figura 2.6.

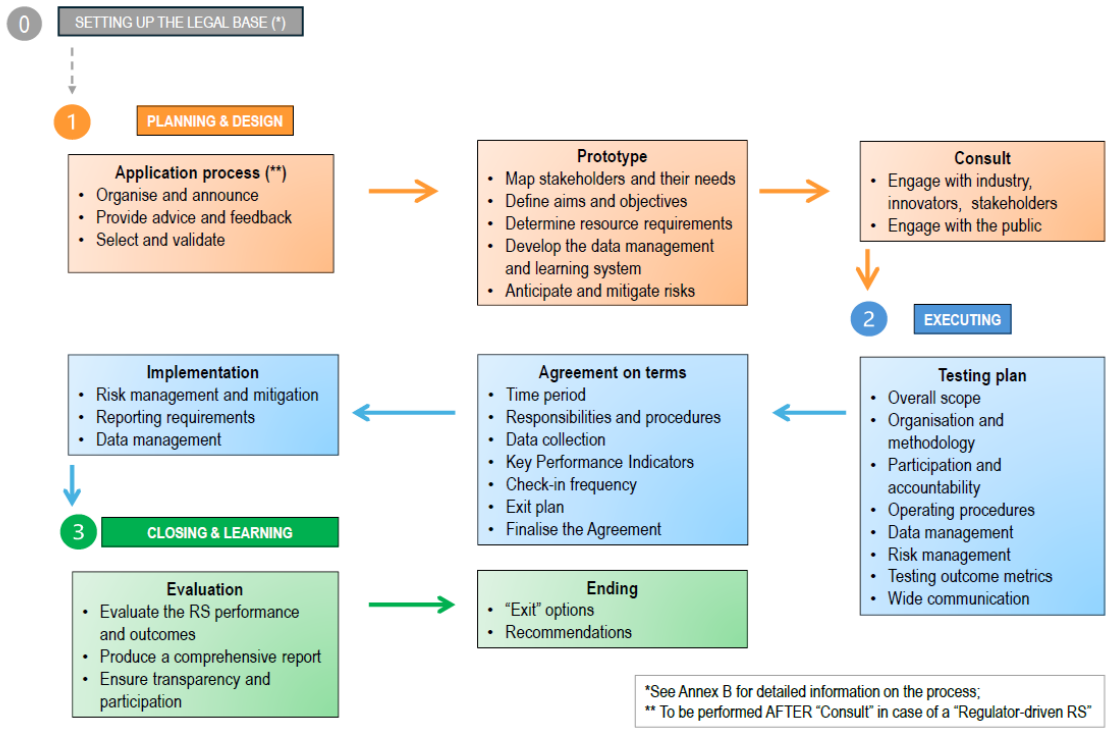


Figura 2.6 - Steps di una sandbox.

Fonte: OECD (2025) [26].

Questa struttura metodologica garantisce che la sperimentazione proceda in modo controllato, tutelando l'integrità del mercato e generando al contempo i dati empirici necessari al legislatore per un eventuale aggiornamento normativo.

2.3.1 Fase di progettazione (*design*): processo di selezione dei partecipanti, criteri di ammissibilità e creazione del prototipo normativo

Processo di candidatura

L'efficacia di una *regulatory sandbox* (RS) dipende in modo cruciale dalla strutturazione della fase di orientamento e selezione. Operando in archi temporali definiti e con un numero limitato di partecipanti, il successo di tali strumenti risiede nella capacità di bilanciare il rigore procedurale (necessario a garantire imparzialità e trasparenza) con la flessibilità operativa indispensabile per l'innovazione [26].

Se da un lato la standardizzazione dei criteri di ammissibilità (Figura 2.7) è essenziale per selezionare i progetti tecnologici più promettenti, sicuri e capaci di generare un reale beneficio sociale, dall'altro la previsione di finestre di candidatura flessibili consente alle aziende di avviare l'iter non appena l'innovazione è matura per essere sottoposta ai test [26].

In questo contesto, il regolatore non agisce solo come esaminatore, ma è tenuto a favorire la riuscita della *sandbox* attraverso un costante affiancamento consultivo e la fornitura di materiali informativi mirati [26], garantendo così che i candidati possano conformarsi ai requisiti richiesti sin dalla presentazione della domanda.

Eligibility criteria
Potential participants in RS are typically required to submit applications that are judged on specific eligibility criteria. Eligibility criteria will depend on the scope and focus of the RS but generally will cover five dimensions
Innovativeness – Participant must demonstrate one of the following forms of innovations in its proposed solution: • Innovative products, services, processes, and business models: companies proposing a new business model that leverages emerging or advancing technologies • Scale-up of solution: significantly scale-up of an existing emerging or advancing technology
Need for Regulatory Amendment – Regulation can also be a driver of innovation by providing important preconditions such as a general framework for competition, consumer protection and business processes. Regulatory amendment in many cases may be required due to: • Achieving regulatory compliance takes time and might need to be done gradually • Uncertainty about regulations • Need for waiver, administrative simplification, or deregulation • As a guarantee that controlled risks can be taken without any backlash
Technological Readiness – Participant should ensure that the technology readiness of their business model, products and services fall under one of the following categories: • Fully commercial system that is readily available for customers • First-of-a-Kind commercial system complete and qualified • Demonstrated system operating near commercial scale (advanced prototype)
Societal Benefits – Participant must produce sufficient evidence showing that: • The innovation proposed offers an identifiable and direct benefit (e.g., reducing cost or improving quality of service) or indirect benefits to consumers (e.g. increasing competition), but also society as such (e.g. green innovation) • It has adequately identified and addressed any risks for consumers, markets, and society resulting from its proposed innovation • It has put in place a suitable mitigation plan to manage those risks and ensure protection to consumers throughout the testing
Commercial Potential – Participant must provide prove that the innovation proposed has strong commercial viability with: • A commercial presence with one or more successfully marketed products and solutions; and • A robust business plan • Proof of business financial viability / funding (including with regard to the capacity to sustain the costs linked to the participation in the sandbox)
Testing and Exit Plan – Participant must produce a well-developed testing and exit plan (exit after successful testing and for the event of discontinued testing) that contain: • A comprehensive testing plan with key milestones and detailed timelines • A clear methodology of the testing and controls required • Test team named with details of their roles in the test and within the overall organisation • Reporting schedule stating the format and content (e.g. KPIs) of the report to be submitted to the regulator throughout the testing • Plans to scale-up its innovation to a larger market should the testing be successful • Clear and measurable consumer safeguards

Figura 2.7 - Criteri di eleggibilità.

Fonte: OECD (2025) [26].

La valutazione delle domande presentate dai partecipanti varia da una *sandbox* normativa all'altra, pertanto, i criteri e i sistemi di punteggio dovrebbero essere progettati caso per caso [26]. Ciononostante, è possibile fare riferimento a indicatori generali, sia positivi che negativi, che possono guidare il processo

di selezione come quelli mostrati di seguito in Figura 2.8, riportati nel *Regulatory Sandbox Toolkit* dell'OECD:

- ***Maturità tecnologica*:** l'innovazione proposta non deve essere un concetto astratto, ma un sistema già pronto per il mercato o un prototipo avanzato in grado di operare su scala pre-commerciale [26].
- ***Necessità di deroga normativa:*** il candidato deve dimostrare in modo inequivocabile che l'attuale quadro normativo impedisce la commercializzazione dell'innovazione, giustificando così il bisogno essenziale di operare all'interno della sandbox [26].
- ***Benefici per la società e gestione dei rischi:*** l'innovazione deve offrire vantaggi chiari e misurabili. Parallelamente, l'azienda deve presentare una mappatura dei potenziali rischi per il mercato e per la società, integrata da un piano di mitigazione per garantire la protezione durante il test [26].
- ***Piano di test e di uscita:*** il candidato deve fornire fin dall'inizio un piano di sperimentazione (*Testing and Exit Plan*) che identifichi tempistiche, indicatori chiave di prestazione (KPI), metodologie di raccolta dati e, soprattutto, una "strategia di uscita" in caso di interruzione anticipata o fallimento del test [26].

Positive Indicators in Applications	Negative Indicators in Applications
Innovativeness	
Few or no comparable offerings in the national market.	Several examples of similar technologies already deployed in the national markets
Offering / solution leverages emerging or advancing technologies	Offering / solution only leverages conventional technologies
Participant produces a comparison of key features of business model, product or service highlighting where it is differentiated vs. competitors	Participant is not able to prove that their offering is significantly different from the existing ones in the market
Need for regulatory amendment	
Participant proves that there is a need for regulatory waivers or revisions to be able to commercialise their offering / solution	Participant is unable to establish that there is any scope for regulatory reform or need for waivers
Offering the solution outside of the RS carries a significant risk of incurring penalties or facing regulatory / legal action	Offering the solution outside of the RS bears no risk of incurring penalties or facing regulatory / legal action
Technological readiness	
Participant successfully proves that full commercial system is readily available for customers	Participant is only able to demonstrate an intermediate prototype or a pilot prototype
Participant has successfully demonstrated a First-Of-A-Kind commercial system that is complete and qualified	Participant is only able to demonstrate small scale system tested in a laboratory
Participant has successfully demonstrated a system operating near commercial scale (advanced prototype)	Participant is only able to demonstrate basic function or formulate the technological concept
Commercial potential	
Participant has a commercial license for one or more successfully marketed offerings	Participant has no commercial licence or partnership agreement with national authorities licenced business
Participant has a strong business track record	Participant has a commercial licence, but shows no or limited commercial activities
Participant has a robust and promising business plan	Participant has an unproven or unviable business plan
Participant is adequately capitalised on their balance sheet or agreed available funding (debt or equity or corporate budget)	Participant has limited evidence to show how they will fund tests
Societal potential	
Participant provides research or simulation results showing potential benefits such as reducing cost, customer experience, efficiency, quality of product, lower prices, environmental footprint, etc.	Participant is unable to articulate how the innovations that are proposed can result in a clear benefit, whether direct or indirect, for consumers or society as large
The participant can produce a comprehensive assessment of risk to consumers and other societal stakeholders, including the environment as well as a mitigation plan to ensure consumer protection, but also other societal concerns, e.g. environmental protection	Participant is unable to provide a detailed set of risks including a set of mitigants that will ensure an adequate degree of consumer protection and the protection of other societal objectives.
The participant has sufficient resources in place to provide appropriate redressal to consumers and other societal stakeholders if required	Participant cannot deploy resources proportional to the risks identified in case a redressal is required
Testing and exit plan	
Participant produces a comprehensive testing plan that identifies key milestones, a timeline, and likelihood of achieving target outcomes	Participant is not able to provide CST with the results of any previous research or results of lab simulations carried out prior to the submission of the application
Participant can demonstrate that the resources and test team credentials required to start testing can be successfully mobilised	The participant cannot demonstrate that the test team has the skills or ability to mobilise the resources required to conduct the testing
Participant proposes key metrics and parameters to be used and methodology for their analysis	No clear description around on metrics that will be measured, or the tools used to capture information
Participant produces an exit strategy that clearly identifies the various possible endgames of the testing exercise (incl. discontinued testing)	The participant's existing strategy is inconclusive with no provisions for settlement of obligations (if any)
The participant's exit strategy contains details on resources needed to scale-up the technology to serve a larger market and estimated timelines	The participant's exit strategy provides simplistic description to scale-up the operation, but with no detail around how it will seek to achieve it

Figura 2.8- Indicatori generali per l'assegnazione dei punti.

Fonte: OECD (2025).

Prototipazione della sandbox

Prima ancora di costruire una sandbox, si parte dalla realizzazione di una sua prima versione o 'prototipo' che spieghi il modo in cui essa funzionerà ed il suo scopo principale [26]. Nello specifico, il *Toolkit* suggerisce di seguire le fasi di:

1) **Mappatura degli stakeholder e delle loro esigenze:** risulta prioritario mappare con precisione gli attori coinvolti nella sandbox, definendone rigorosamente ruoli e modalità d'intervento [26]. Tale analisi deve includere un ampio spettro di stakeholder, dagli attori industriali (*startup*, PMI e *incumbents*) alle autorità di regolamentazione e alla società civile, distinguendo tra partner primari e partecipanti attivi o occasionali [26]. È essenziale, inoltre, approfondire le necessità inespresse, gli interessi e le sfide critiche percepite dall'industria [26].

   Una volta identificati tali soggetti, bisognerà delineare un piano di coinvolgimento strutturato che garantisca che il loro contributo possa plasmare e sostenere attivamente l'iniziativa (si veda la Figura 2.9) e definire i canali di comunicazione più efficaci per raggiungerli [26]. In questa fase, è opportuno avviare dialoghi informali con i principali innovatori per raccogliere prospettive esterne alle autorità di regolamentazione, identificando le sfide normative e industriali più urgenti [26].

Template for stakeholder engagement plan						
Stakeholder	**Role in RS**	**Engagement Methods**	**Communication Channels**	**Feedback Mechanisms**	**Evaluation Metrics**	**Next Steps**
....						
Ministry of Transport	Regulator overseeing transport laws and ensuring policy alignment for APS deployment.	Regular working group meetings, policy briefings, and participation in sandbox design.	Monthly reports, regulatory workshops, email updates.	Formal policy consultations, legal framework reviews, direct ministerial input.	Number of policy adaptations informed by the RS, regulatory feedback received, alignment of legal framework with project goals.	Define policy recommendations for broader APS deployment and update relevant transport laws based on sandbox findings.
....						
....						

Figura 2.9- Template for stakeholder engagement plan.

Fonte: OECD (2025) [26].

Questo approccio offre l'opportunità di sottoporre ad una prima valutazione (*soundboarding*) il concept della sandbox prima di impegnarsi in uno specifico modello di implementazione [26]. Il coinvolgimento degli stakeholder in tutte le fasi della sperimentazione assicura infatti che il processo sia fluido e capace di generare benefici trasversali. Infatti, se da un lato gli innovatori ottengono un percorso protetto per il *testing*, dall'altro i regolatori acquisiscono le evidenze necessarie per perfezionare le politiche pubbliche, a vantaggio di una maggiore trasparenza per i consumatori [26]. In ultima analisi, mentre per alcuni gruppi sarà necessario un contributo diretto nella fase di *design*, per altri sarà sufficiente un flusso informativo costante, volto a costruire consenso e supporto attorno ai risultati finali dell'esperimento [26].

2) **Definizione degli scopi e degli obiettivi:** ancor prima di procedere alla definizione degli aspetti tecnici della sandbox, l'autorità di regolamentazione deve delinearne con chiarezza gli obiettivi strategici. Tali finalità devono essere elaborate in stretta sinergia con i principali *stakeholder*, al fine di formalizzare un consenso condiviso [26]. Definire obiettivi comuni *ex-ante* rappresenta, infatti, una condizione imprescindibile per agevolare, al termine della sperimentazione, la valutazione rigorosa e la misurazione del successo dell'iniziativa [26].

3) **Determinazione del fabbisogno di risorse:** il regolatore deve valutare con precisione le risorse necessarie per gestire l'intero ciclo di vita del progetto, coprendo le infrastrutture fisiche e digitali, le capacità legali e di comunicazione, e il supporto tecnico ai partecipanti [26].

   Per agevolare questa valutazione, il *Regulatory Sandbox Toolkit* dell'OECD suggerisce l'impiego del template *'Resource needs assessment'* (riportato in Figura 2.10). Si tratta di una tabella analitica che consente al regolatore di mappare in modo sistematico le tre risorse chiave (Tempo, Persone e Fondi), mettendo a confronto le dotazioni attualmente a disposizione con le effettive necessità del progetto. Il *framework* richiede inoltre di definire il livello di priorità per ciascuna voce e di valutare preventivamente i rischi che scaturirebbero dalla mancanza di tali risorse [26].

Resource needs assessment						
Resource	**What we have today**	**What we need**	**Priority level**	**Source**	**What risks we face not having these resources**	**Deadline**
Time						
People						
Funding						

Figura 2.10 - Resource needs assessment.

Fonte: OECD (2025) [26].

4) Identificazione e mitigazione dei rischi: durante la progettazione, è fondamentale elaborare un profilo iniziale dei potenziali rischi (operativi, finanziari, regolatori e reputazionali) per identificare i cosiddetti "campanelli d'allarme" (*red flags*). Poiché durante l'implementazione pratica possono emergere criticità impreviste, il progetto deve includere rigorose strategie di mitigazione, strutturate sui seguenti pilastri operativi:

- ***Protocolli di sicurezza:*** il regolatore deve adottare un approccio precauzionale, istituendo procedure interne chiare per rispondere tempestivamente alle emergenze [26]. A tal fine, è indispensabile definire canali accessibili che garantiscano un ciclo di *feedback* continuo tra i partecipanti alla sandbox, i regolatori e gli stakeholder [26].

- ***Soglie di interruzione:*** è necessario definire chiaramente i *stop-loss triggers* (o soglie di *escalation*), ovvero le condizioni (es. un numero eccessivo di lamentele dei consumatori o impatti ambientali avversi) al verificarsi delle quali i test devono essere immediatamente messi in pausa, modificati o interrotti per prevenire danni sistemici [26].

A supporto dell'identificazione preventiva delle cosiddette "*red flags*", il *Regulatory Sandbox Toolkit* dell'OECD propone una specifica matrice di valutazione (Figura 2.11). Questo framework categorizza le potenziali minacce in quattro macroaree di impatto che aiutano l'ente regolatore ad associare a ciascuna vulnerabilità la corretta strategia di mitigazione: mercati, consumatori, ambiente e società.

What are the potential risks involved?	How will those risks be mitigated?
Markets • Market Integrity: If companies in the RS engage in unethical or risky behaviour, it could undermine market integrity. • Distorted Competition: RS might create an uneven playing field, giving an unfair advantage to companies within the sandbox over those that follow standard regulations.	
Consumers • Consumer Protection: Reduced regulatory oversight might lead to products or services that are not adequately tested, potentially harming consumers. • Lack of Recourse: Consumers might have limited options for recourse if something goes wrong with a product or service developed in a RS.	
Environment • Environmental Oversight: Reduced regulation might lead to less stringent environmental checks, potentially resulting in harmful environmental practices. • Sustainability Risks: Companies focusing on short-term innovation within the RS might neglect long-term sustainability considerations.	
Society • Social Inequality: Benefits of innovation within RS might not be evenly distributed across society, potentially widening social inequality. • Public Trust: Failures within a sandbox can erode public trust in both the regulatory system and the technologies.	
Others • Please specify:	

Figura 2.11 - Risk Identification, Management and Mitigation.

Fonte:OECD (2025) [26].

5) **Sviluppo del sistema di gestione dati e monitoraggio:** a conclusione della fase di prototipazione, l'ente regolatore deve strutturare la fondamentale architettura informativa della *sandbox*. Essendo quest'ultima uno strumento di apprendimento empirico, la validità e l'affidabilità delle future riforme normative dipenderanno interamente dalla qualità delle evidenze raccolte durante i test [26]. A tal fine, il *Regulatory Sandbox Toolkit* dell'OECD prescrive la definizione ex-ante di un solido sistema di gestione dei dati (a) e di un rigoroso protocollo per il loro monitoraggio (b).

a) ***Gestione e qualità dei dati:*** un sistema di gestione dei dati ben funzionante è il fattore critico di successo per l'intera operazione, in quanto riduce le ridondanze, semplifica i flussi di lavoro, garantisce l'assoluta trasparenza e definizione delle responsabilità [26]. Affinché le analisi e i report siano realmente utili ai processi decisionali del legislatore, l'intero apparato informativo (dalla fonte fino all'utilizzo finale del dato) deve rispettare severi standard qualitativi.

   A supporto di questa valutazione, il manuale propone uno schema (riportato in Figura 2.12) che incrocia i processi di gestione con i cinque criteri fondamentali della qualità dei dati:

Indicator		Date reviewed	
Reviewer(s)		Data source	
Criterion	**Definition**	**Yes/No**	**Explanation**
Validity	Do the data clearly and adequately represent the intended result? Some issues to consider are: • Face Validity. Would an outsider or an expert in the field agree that the indicator is a valid and logical measure for the stated result? • Attribution. Does the indicator measure the contribution of the project? • Measurement Error. Are there any measurement errors that could affect the data? Both sampling and non-sampling error should be reviewed.		
Reliability	Do data reflect stable and consistent data collection processes and analysis methods over time?		
Precision	Are data sufficiently precise to present a fair picture of performance and enable management decision-making at the appropriate levels?		
Timeliness	Are data timely enough to influence management decision-making (i.e., in terms of frequency and currency)?		
Integrity	Do the data collected, analysed and reported have established mechanisms in place to reduce manipulation or simple errors in transcription?		
Key issues and recommendations (summary):			

Figura 2.12 - Data quality criteria.

Fonte: OECD (2025) [26].

Nel dettaglio, per assicurare l'aderenza a questi parametri, il regolatore dovrà operare specifici controlli:

- ✓ **Validità:** assicura che i dati misurino effettivamente ciò che si intende misurare (la correlazione tra causa ed effetto del test), verificando l'adeguatezza delle fonti, le definizioni e la completezza dei campioni [26].
- ✓ **Affidabilità:** garantisce che la misurazione sia stabile e coerente nel tempo [26]. Richiede di valutare accuratamente le metodologie per escludere distorsioni dovute a variazioni temporali o all'eventuale inesperienza dei soggetti preposti alla raccolta [26].
- ✓ **Precisione:** richiede che i dati siano accurati (privi di bias sistematici) e precisi (con un margine di errore accettabile e inferiore al cambiamento misurato), fornendo un livello di dettaglio sufficiente a giustificare decisioni normative di alto livello [26].
- ✓ **Tempestività:** stabilisce che la frequenza di raccolta e reportistica sia calibrata in modo che il dato possieda ancora il suo pieno valore strategico nel momento esatto in cui il regolatore deve prendere una decisione [26].
- ✓ **Integrità:** tutela le informazioni da alterazioni, siano esse intenzionali (es. manipolazioni per conflitti di interesse) o involontarie (errori di trascrizione o arrotondamento), garantendo la totale affidabilità etica e tecnica dei risultati [26].

b) ***Piano di raccolta e monitoraggio*:** oltre a definire gli standard qualitativi, il prototipo deve pianificare materialmente come acquisire le informazioni. La raccolta dovrebbe iniziare non appena prende avvio la fase di test, prevedendo l'acquisizione di una *baseline* (i valori di partenza antecedenti all'esperimento) per permettere una valutazione empirica dell'impatto [26].

Dal punto di vista operativo, la raccolta dati impone l'adozione di rigorosi requisiti legali: è difatti obbligatorio rispettare le normative sulla *privacy* (come il GDPR europeo per la protezione dei dati), ottenere il consenso informato dai partecipanti alla *sandbox* ed estrapolare solo le informazioni strettamente vitali per gli scopi del test, al fine di ridurre i rischi legati alla sicurezza informatica [26].

Per strutturare organicamente questo processo, il Toolkit raccomanda la compilazione di un "Piano di Raccolta Dati" (*Data Collection Plan*). Questo framework, illustrato nella Figura 2.13, obbliga il regolatore a inquadrare le responsabilità operative secondo le direttrici del Cosa, Dove, Chi, Quando e Come.

Data source What? Where?	Data collection strategy Who? When? How?	Data analysis strategy Who? When? How?
Guiding questions: • What data will be gathered? • Where will the data be sourced from?	Guiding questions: • Who will collect the data? • When are the different points at which data will need to be collected? • How will the data be collected – for example through questionnaires, expert assessment or other methods?	Guiding questions: • Who will complete the data analysis and do they have the right skills? • When will the analysis take place, including the final and any intermediate analysis? • How will the data be analysed and used to prove or disprove the hypothesis, or to yield the learning sought?

Figura 2.13 - Data Collection Plan.

Fonte: OECD (2025) [26].

Attraverso la formalizzazione congiunta delle valutazioni dei rischi e di queste due matrici per il governo dei dati (*a, b)*, il legislatore conclude la complessa stesura del prototipo.

Lo spazio sperimentale dispone ora di obiettivi misurabili, risorse stanziate, paracaduti di sicurezza e un rigoroso sistema di valutazione empirica, risultando istituzionalmente pronto al passaggio verso la firma dell'accordo e l'esecuzione materiale del test.

2.3.2 Fase di esecuzione e monitoraggio (*testing*): gestione delle deroghe temporanee e supervisione attiva da parte delle autorità aeronautiche

Una volta conclusa la progettazione del prototipo, la regulatory sandbox entra nel suo stadio operativo. Come sottolineato dal *Regulatory Sandbox Toolkit* dell'OECD, l'implementazione di una sandbox non deve essere intesa come un'esecuzione inserita con il "*pilota automatico*" [26]. Essendo incentrata sull'apprendimento continuo, questa fase richiede un alto grado di flessibilità e un monitoraggio costante per adattare i processi qualora le dinamiche operative lo richiedano [26].

A livello pratico, l'esecuzione si concretizza nell'avvio di uno o più "Test di Sandbox" (*Sandbox Tests*). Tali tests sono vere e proprie simulazioni condotte in circostanze realistiche che permettono al legislatore di osservare empiricamente l'impatto dell'innovazione [26].

Secondo le linee guida dell'OECD, questa macro-fase si articola in tre passaggi fondamentali:

1) **La progettazione del piano di sperimentazione (*Testing Plan*):** il primo passo operativo consiste nell'elaborazione del "*Testing Plan"*, un documento strategico che il regolatore sviluppa a stretto contatto con le imprese partecipanti [26]. Ogni piano è rigorosamente costruito "*ad hoc*" e serve a definire cosa verrà testato, in che modo e per quale motivo [26]. Affinché il piano sia considerato solido e in grado di condurre a decisioni normative chiare al termine della prova, il *Toolkit* prescrive che esso includa i seguenti elementi standard:

   - ***Scopo generale e tempistiche:*** definizione precisa dell'oggetto del test, del *budget* e dell'orizzonte temporale [26].
   - ***Organizzazione e procedure operative:*** descrizione delle fasi del test, delle metodologie, delle iterazioni previste e delle "regole di ingaggio" per la comunicazione e l'esecuzione [26].
   - ***Partecipazione e responsabilità:*** identificazione dello staff coinvolto, dei partner e dei relativi ruoli [26].
   - ***Gestione dei dati e dei rischi:*** protocolli rigorosi per la raccolta e la protezione dei dati (inclusa la privacy e la sicurezza informatica), nonché le strategie per mitigare i rischi [26].
   - ***Metriche e comunicazione:*** definizione degli indicatori di risultato (KPI) e di una strategia di comunicazione verso il pubblico [26].

2) **La stesura dell'accordo legale (*Agreement on Terms*):** affinché la sperimentazione possa avere formalmente inizio, i contenuti del *Testing Plan* devono essere tradotti in un documento legale vincolante (che può assumere ad esempio la forma di un contrattoo di una licenza temporanea) che verrà sottoscritto da tutti i soggetti coinvolti prima dell'avviamento di qualsiasi fase di testing [26]. Questo accordo formalizza le aspettative e gli obblighi reciproci, aggiungendo un quadro di *governance* al piano operativo [26]. Le clausole fondamentali (riportate in Figura 2.14) che devono essere sottoscritte includono:

   - ***Limiti temporali:*** la durata del test, che può variare da poche settimane fino a diversi anni a seconda del grado di maturità della tecnologia [26].
   - ***Responsabilità e frequenza dei controlli:*** la frequenza con cui l'innovatore dovrà condividere le informazioni e la programmazione di incontri informali regolari (*check-in frequency*) per identificare le criticità prima che si trasformino in problemi sistemici [26].
   - ***Raccolta di dati e KPI:*** l'impegno a fornire report cadenzati e condividere i dati grezzi necessari per misurare le performance aziendali (es. soddisfazione degli utenti) e gli impatti sistemici (es. impatto ambientale) [26].
   - ***Piano di uscita (Exit Plan):*** clausole che garantiscano un'interruzione sicura dei test per evitare disservizi [26]. È cruciale che l'accordo espliciti il diritto di entrambe le parti di interrompere il test in qualsiasi momento e chiarisca che la partecipazione alla sandbox non garantisce in alcun modo il futuro rilascio di una licenza operativa permanente [26].

Elements of the legal document	Description
Time period	If the time limit of each test hasn't been established by the overall design of the sandbox or by the wording of an exemption clause, regulators will want to confirm this with each participant depending on what they are testing. The time available for testing varies significantly and can be anything from eight to ten weeks to several years. Longer testing arrangements tend to be used to investigate less mature technologies such as autonomous vehicles
Responsibilities and procedures	Each agreement should also include stipulations on responsibilities and procedures over the course of testing (e.g. how often the innovator will need to share information and in what form) and what should happen if a particular incident should occur (i.e. how and when the test would be stopped). Risk and impact assessments should be done upfront and can help identify areas that will need closer monitoring by the regulator or its agents
Data collection	In order to measure these outcomes, participants and regulators need to identify what kind of data is needed, how this will be collected and by whom. Participants will be expected to provide data through reports, e.g., on the number of complaints or safety-related incidents, and to share raw data where possible
Key Performance Indicators (KPIs)	At this stage, participants should be asked to identify any Key Performance Indicators (KPIs) related to their business objectives (e.g. customer satisfaction), while also working with the regulator to identify other key outcomes that need to be assessed (e.g. environmental impacts in the form of emissions)
Check-in frequency	Regular, informal meetings should be arranged with participants to identify areas of potential concern before issues arise.
Exit plan	Sandbox agreement should also include an exit plan to avoid disruption at the end of the sandbox or if the participant should exit part way through the testing phase. Parties should be given the option to terminate the test at any time.

Figura 2.14 - Clausole contrattuali.

Fonte: OECD (2025) [26].

3) **Implementazione, monitoraggio e raccolta dati:** L'ultimo step della fase esecutiva coincide con l'avvio materiale del test. Per l'intera durata delle simulazioni, è richiesto agli innovatori di mantenere un flusso di comunicazione ininterrotto con le autorità, condividendo i progressi e segnalando in tempo reale l'insorgere di eventuali anomalie, secondo i protocolli definiti durante la fase di progettazione [26]. Ai fini analitici, è imperativo che la registrazione di tali informazioni avvenga in formato standardizzato, così da garantire la piena comparabilità dei risultati [26].
Durante l'implementazione della sandbox, l'attività principale del regolatore consiste nella supervisione e nell'acquisizione dei dati, partendo dalla misurazione della *baseline* (i valori antecedenti all'esperimento) per poter effettuare un confronto accurato dell'impatto dell'innovazione [26].

   Per quanto concerne il livello di monitoraggio da adottare, le linee guida dell'OECD stabiliscono che la frequenza e la rigidità dei controlli debbano riflettere la criticità del prodotto o servizio in esame: le innovazioni ad alto rischio impongono l'organizzazione di incontri di supervisione con cadenza settimanale o mensile [26]. In questa fase, il regolatore non si limita a un ruolo passivo, ma instaura un flusso di informazioni bidirezionale: da un lato raccoglie i report sui progressi dell'impresa, dall'altro fornisce consulenza e orientamento tempestivo [26]. Qualsiasi incidente che comprometta la sicurezza, violazioni dei dati o frodi deve essere segnalato e affrontato immediatamente, attivando, qualora le soglie limite di rischio vengano superate, i protocolli di mitigazione o l'interruzione anticipata della sperimentazione [26] disegnati durante la fase di progettazione.

2.3.3 Fase di valutazione e strategia d'uscita (exit): dalla sperimentazione alla norma definitiva

L'ultima fase del ciclo di vita di una regulatory sandbox rappresenta il momento in cui la sperimentazione giunge al termine e i dati grezzi raccolti vengono trasformati in decisioni strategiche e normative [26]. Secondo le linee guida del *Toolkit* dell'OECD, l'obiettivo di questa fase non è limitarsi a stabilire il

successo o il fallimento di un singolo test, ma ricavare lezioni sistemiche (sia specifiche che generali) utili per i decisori pubblici, per l'industria e per la società nel suo complesso [26]. Questa fase conclusiva si articola in due momenti fondamentali: la valutazione rigorosa dei risultati (a) e la determinazione delle opzioni di uscita (*Exit Options*) (b).

a) **Valutazione della sandbox:** la valutazione finale si fonda sulle attività di monitoraggio e reportistica condotte durante la fase esecutiva, e utilizza i *Key Performance Indicators* (KPI) predeterminati nel *Testing Plan* per misurare oggettivamente i risultati ottenuti [26].
   L'OECD raccomanda che il processo valutativo indaghi sia l'efficienza della procedura in sé (come la *sandbox* è stata gestita), sia l'effettivo impatto dell'innovazione testata (*outcomes*) [26].

Il risultato di questa indagine deve confluire in un "*report di valutazione***"** strutturato, che fornisca informazioni trasparenti sui seguenti elementi chiave (come schematizzato in Figura 2.15):

- ***Analisi dei risultati (Assessment):*** una disamina sull'adeguatezza dei dati raccolti e sul coinvolgimento degli *stakeholder* [26]. Deve chiarire se il test ha confermato o smentito l'ipotesi di partenza, documentare le lezioni apprese, verificare se i rischi previsti si sono materializzati e valutare l'efficacia delle misure di mitigazione adottate [26].
- ***Conclusioni:*** un giudizio definitivo sul valore pubblico atteso dall'innovazione e sulla sua effettiva fattibilità all'interno delle normative vigenti [26].
- ***Raccomandazioni:*** l'identificazione formale delle azioni successive (*follow-up actions*) che l'autorità o il legislatore dovrebbero intraprendere [26].

Elements of the evaluation report	Description
Introduction	Clearly articulated goals are a fundamental starting point for effective evaluation. This section is a narrative describing the objectives of the sandbox, its timing, the number / duration / location of the tests, as well as the parties participating in the exercise. This part should mirror the Testing Plan, outlining all the procedural steps and the measures undertaken to execute the sandbox.
Assessment	Several points should be elaborated in the appraisal of the exercise, including both results and process considerations: • The extent to which the right data was collected and utilised to evaluate the exercise against the Evaluation Plan • The extent to which all key stakeholders were involved • The appraisal of the efficiency of the exercise in terms of resources • The extent to which the sandbox has achieved its aims and objectives, based on the selected criteria and KPIs • Whether the results of the exercise are sufficiently robust to validate/partially support/disprove the hypothesis and, by extension, to inform the next steps, including potential adjustments to the innovation, additional testing, or moving towards full market entry • What insights emerged during the exercise and how do they relate to the planned outcomes - what was learned from the experiment, including informing future sandboxes • Whether and why the possible risks identified have materialised or not; how they have been addressed and mitigated • Whether the experiment generated additional positive outcomes • Whether it has generated unexpected / unintended consequences, and how these can be avoided.
Conclusions	The conclusions from the sandbox exercise should indicate (as a minimum): • The potential expected public value of the innovation tested, and where further uncertainties may remain • The viability / acceptability of introducing the innovation, under existing regulations • In case, which changes should be made to the regulatory framework to overcome any barriers to authorisation and marketing and to upscale the innovation
Recommendations	The final part of the evaluation report should indicate the follow-up actions stemming from the exercise – see "Exit" below.

Figura 2.15 - Elementi del report di valutazione.

Fonte: OECD (2025).

Per garantire che la sandbox esprima il suo massimo potenziale di apprendimento, l'OECD suggerisce di condurre l'esame "*in modo trasparente e partecipativo*" [26]. Nel caso di sandbox particolarmente complesse, l'autorità regolatrice può persino affidare la stesura del report a valutatori indipendenti (come istituzioni accademiche o ONG) per assicurare l'assoluta imparzialità dell'indagine [26]. Inoltre, al fine di tracciare l'implementazione pratica di tali lezioni, è raccomandata la creazione di un *Follow-up Worksheet*: un documento di gestione in cui il regolatore risponde formalmente a ciascuna raccomandazione emersa, indicando se viene accettata, rigettata o parzialmente accolta, e definendo le tempistiche per la sua applicazione normativa (Figura 2.16) [26].

Conclusion from the RS evaluation

e.g. Type A drones proved to be suitable to safely dispatch drugs and other parcels of up to 1.5 kg in weight and over a 15 km distance for commercial purposes.

Related recommendation

e.g. Regulatory amendments should be introduced to allow the use of air space over settlements for these drones, between 50 and 100 meters above ground.

Deliberation by the management (regulator)

e.g. "Agreed"

Measure	Responsibility	Deadline	Controlling
Prepare legal amendments, incl. technical standards	Ministry of transport	6 months	Ministerial procedure
Adoption and entry into force of the regulation	Ministry of Transport	9 months	Ministry of Transport GLO
Enforcement of the regulation and reporting	Municipal police	12-24 months	Ministry of Transport
...			

Note: (1) The Follow-up Worksheet should include as many sections as there are relevant / actionable conclusions and recommendations.
(2) The example used here is fictional and purely illustrative.

Figura 2.16 - Possibile template per il Follow-up Worksheet (esempio).

Fonte: OECD (2025) [26].

b) **Fine della sperimentazione e le opzioni di uscita (*Ending the Sandbox*):** il completamento della fase di test, anche in caso di esito totalmente positivo, non garantisce la licenza automatica per immettere il prodotto o servizio su larga scala [26].
Al termine della sandbox, il legislatore deve analizzare le raccomandazioni del report e scegliere una specifica "opzione di uscita" (*Exit Option*) [26]. Il *Regulatory Sandbox Toolkit* identifica quattro scenari principali (vedi Figura 2.17):

- ***Divieto di operare* (*Prohibition to operate*):** se le autorità regolatorie ritengono che i rischi (sistemici, sociali o ambientali) superino i benefici attesi allora l'innovazione viene giudicata inadatta al mercato e la sua commercializzazione viene vietata [26].

- ***Approvazione secondo i regimi vigenti* (*Approval under current licensing regimes*):** se i test dimostrano che il prodotto, contrariamente alle incertezze normative iniziali, rispetta pienamente gli standard previsti dalle leggi esistenti, l'impresa riceve la regolare autorizzazione a operare sul mercato [26].

- ***Approvazione subordinata a modifiche* (*Approval conditioned upon modifications*):** l'immissione sul mercato viene concessa, ma rimane vincolata all'adozione di specifiche modifiche tecniche da parte dell'innovatore, oppure alla concessione di ulteriori deroghe (o esenzioni permanenti) da parte dell'autorità competente [26].

- ***Cambiamento normativo* (*Regulatory Change*):** rappresenta l'esito più raro [26]. Le evidenze empiriche dimostrano che la tecnologia è sicura e vantaggiosa, ma l'attuale quadro legale non è in grado di inquadrarla correttamente (es. nuove filiere o *feedstock* per i SAF) [26]. In questo scenario, il legislatore utilizza i dati generati dalla sandbox per avviare formalmente un processo di aggiornamento delle leggi, colmando il vuoto normativo [26].

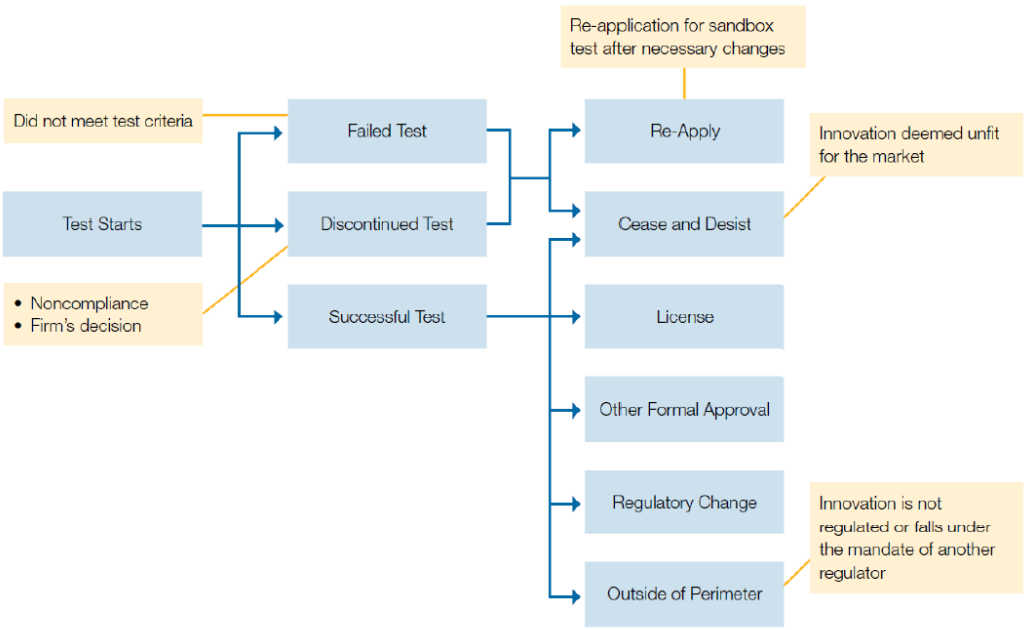


Figura 2.17 - Possibili opzioni di uscita da una Sandbox

Fonte: Jenik and Duff (2020).

2.4 Analisi di casi studio e best practices internazionali

Il passaggio dalla teoria alla pratica regolatoria trova la sua massima espressione nell'analisi delle iniziative internazionali. Diversi enti governativi e agenzie per la sicurezza aerea hanno già iniziato a implementare ambienti sperimentali e meccanismi di supporto flessibili per gestire la transizione ecologica.

L'esame di questi casi studio, dal Regno Unito, all'Unione Europea, fino all'Italia, fornisce evidenze empiriche cruciali su come le regulatory sandboxes e la fase di *testing* possano accelerare l'immissione sul mercato dei carburanti innovativi senza compromettere gli standard di sicurezza.

2.4.1 L'esperienza pionieristica del Regno Unito: la sandbox della *Civil Aviation Authority (CAA)* per i carburanti innovativi

La *Civil Aviation Authority* (CAA) britannica ha istituito una regulatory Sandbox dedicata specificamente all'utilizzo dell'idrogeno come carburante per l'aviazione [30]. Inserita nel più ampio contesto del progetto *Hydrogen Challenge*, l'*Hydrogen Sandbox* è coordinata dal *Technical Strategy Lead Zero Emissions Flight* della CAA e avviata con uno stanziamento iniziale di circa 940.000 sterline proveniente dal *Regulators' Pioneer Fund* [42]. Il progetto si distingue per una spiccata natura interdisciplinare, avvalendosi della sinergia tra diversi dipartimenti dell'ente, nello specifico: *Innovation Advisory Services*, *Design and Certification*, *Continuing Airworthiness*, AAA (*Airspace, Air Traffic Management & Aerodromes*) e il dipartimento di *Sustainability [30]*.

Dal punto di vista metodologico, lo spazio di sperimentazione adotta rigorosi cicli di lavoro guidati da ipotesi, definiti cicli *Build-Test-Learn* [30] (in Figura 2.18) che richiamano gli steps di progettazione, esecuzione e chiusura affrontati nei capitoli dedicata alla teoria di questi strumenti normativi. Tale

approccio permette di accelerare l'apprendimento derivato dalla fase di *testing* e costruire nuove *policy* aeronautiche che colmino le attuali lacune normative [30].

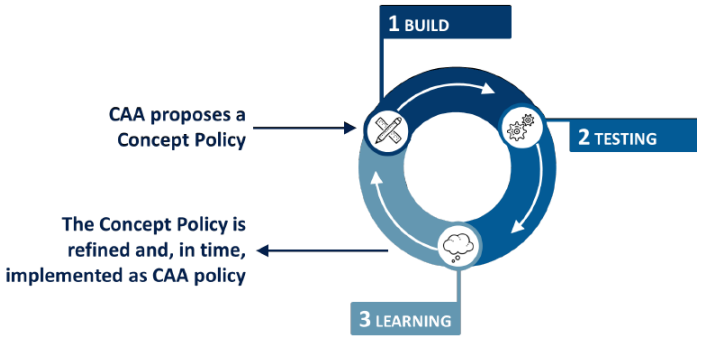


Figura 2.18 - Ciclo Build-Test-Learn.

Fonte: CAA (2024) [30].

La sandbox ha coinvolto alcuni dei principali attori dell'industria aeronautica globale e mira a intervenire su diverse aree tecnologiche (Figura 2.19). In particolare, le sperimentazioni in corso coprono l'intera filiera dell'idrogeno per quanto concerne:

- **Sistemi di propulsione innovativi:** all'interno della sandbox, aziende come *ZeroAvia* stanno testando e validando i requisiti di sicurezza per la certificazione del powertrain idrogeno-elettrico *ZA600* (destinato ad aeromobili fino a 20 posti) [43], avvalendosi di un prototipo Dornier 228 utilizzato come banco di prova volante [42]. Parallelamente, *Cranfield Aerospace Solutions* sta sviluppando sistemi propulsivi a celle a combustibile [42], mentre *Rolls-Royce*, in partnership con *easyJet*, sta progettando turbine a gas compatibili con la combustione diretta di idrogeno [43].
- **Infrastrutture aeroportuali e operazioni di terra:** la sandbox non si limita ai soli velivoli, ma indaga i rischi logistici a terra. Il consorzio dell'Aeroporto di Exeter (che include *Regional & City Airports*, TUI e ULEMCo) sta conducendo prove per ridurre l'impatto ambientale delle operazioni di *turnaround* e sperimentare lo stoccaggio e il rifornimento sicuro dell'idrogeno [42]. Su scala ancora più ampia, il *Project 601* presso l'aeroporto di Heathrow mira a sviluppare un *test-bed* (banco di prova) lato volo per la gestione dell'idrogeno gassoso, con l'obiettivo di abilitare operazioni commerciali entro il 2028 [44].

Technology Areas			
Hydrogen gas turbines	Fuel cells & electrical propulsion	Liquid hydrogen tanks	Hydrogen distribution
Thermal management	Aircraft design	Aircraft systems	Airports
Ground operations	Safety & reliability	Fuelling	Hydrogen storage

Figura 2.19- Tecnologie proposte dalla UK Hydrogen sandbox del 2024.

Fonte: CAA (2024) [30].

Nell'ambito di questo ambiente protetto, la CAA assume un ruolo attivo, istituendo un team di esperti per assistere le aziende nella revisione dei piani di test, fornendo riscontri sulle argomentazioni di sicurezza e analizzando criticamente i dati operativi [30]. È tuttavia essenziale sottolineare un elemento giuridico di fondamentale importanza: il principio di *regulatory separation* (Figura 2.20). Infatti, Il supporto fornito nella sandbox serve a valutare la fattibilità tecnologica, ma non garantisce l'approvazione finale [30]. Le decisioni autorizzative rimangono di competenza esclusiva dei dipartimenti regolatori della CAA, al fine di tutelare l'imparzialità istituzionale e la sicurezza del volo [30].

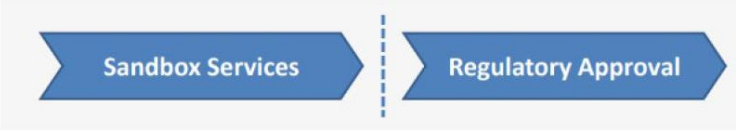


Figura 2.20 - Separazione della Regulatory dai Sandbox services.

Fonte: CAA (2024) [30].

A seguito del successo della fase inaugurale, a inizio 2025 la CAA ha annunciato un'espansione e un'estensione del programma, prolungando la durata delle sperimentazioni per un ciclo triennale con completamento previsto per il 2028, al fine di massimizzare il potenziale di sviluppo delle imprese coinvolte [44]. Sebbene il progetto sia attualmente in pieno svolgimento, non sono stati rilasciati per ora ulteriori documenti ufficiali definitivi. La pubblicazione dei risultati e delle lezioni apprese durante la prima fase del 2024 è attesa nel prossimo futuro [44], rappresentando una fonte fondamentale di dati empirici per l'aggiornamento del quadro normativo.

Nonostante ciò, l'esperienza britannica dimostra come la transizione ecologica dell'aviazione non possa prescindere da una *governance* flessibile. Il successo del modello risiede nella combinazione tra la stabilità economica garantita dallo Stato [36] e la flessibilità burocratica offerta dalla Regulatory Sandbox. La scelta della CAA di condurre tali test in tempo reale evidenzia come l'adozione di un ambiente *safe-to-fail* rappresenti lo strumento privilegiato per consentire alle istituzioni di tenere il passo con il progresso tecnologico, trasformando le incertezze odierne nei dati empirici necessari per la scrittura delle norme aeronautiche del futuro.

2.4.2 Iniziative Europee e il ruolo di EASA: la costruzione di un ecosistema "pre-sandbox" per i carburanti innovativi.

A differenza del Regno Unito, che ha già istituito un ambiente di deroga centralizzato, l'Unione Europea non ha ancora lanciato una regulatory sandbox dedicata esclusivamente all'omologazione dei SAF e dei nuovi vettori energetici. Tuttavia, analizzando l'ecosistema normativo guidato dall'Agenzia dell'Unione Europea per la Sicurezza Aerea (EASA) e dal pacchetto *ReFuelEU Aviation*, emerge chiaramente come le attuali iniziative comunitarie non siano elementi isolati, ma fungano da anelli di una catena strategica. Tali progetti stanno di fatto ponendo le basi infrastrutturali, scientifiche e di monitoraggio necessarie per rendere possibile, in un futuro molto prossimo, l'istituzione di sandbox europee specifiche per l'aviazione a zero emissioni.

Il monitoraggio come base empirica: il *Sustainability Portal*

Il primo prerequisito per l'implementazione di qualsiasi sandbox normativa è la capacità di raccogliere dati affidabili e misurare gli scostamenti dal mercato tradizionale. Così la creazione del *ReFuelEU Aviation Sustainability Portal* da parte di EASA funge da infrastruttura digitale propedeutica [45].

Questa piattaforma ha permesso la pubblicazione nel 2025 del primo *Annual Technical Report* di EASA, documento che offre una prima analisi empirica ufficiale del mercato SAF europeo da utilizzare come punto di partenza (*baseline*) per le analisi future [15]. Il 2025 segna infatti il primo anno di applicazione del Regolamento (UE) 2023/2405 (Regolamento ReFuelEU Aviation) e i dati, raccolti nel 2024, dimostrano la necessità di accelerare l'innovazione tecnologica per superare gli attuali limiti strutturali. Relativamente a questo anno di riferimento sono state fornite 193 chilotonnellate (kt) di SAF in tutta l'Unione (Figura 2.21), concentrate per il 99% in soli cinque Stati membri (Francia, Paesi Bassi, Spagna, Svezia e Germania) [15].

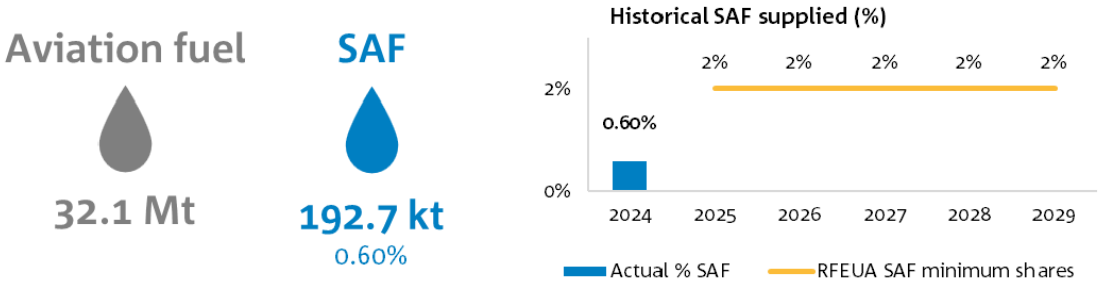


Figura 2.21- Carburante e SAF forniti all'EU nel 2024, tenendo conto del fatto che un terzo dei fornitori di carburante per aerei non hanno rilasciato i loro report e senza considerare la fornitura ad aeroporti non europei.

Fonte: EASA (2025) [15].

Nonostante il 2025 abbia rappresentato l'esercizio inaugurale del nuovo quadro normativo, si può osservare in Figura 2.22 un grado di adesione all'esperimento del 74% degli operatori aerei che ha visto il proprio report validato dalle autorità competenti [15] (in conformità con l'Articolo 8 del regolamento e con l'elenco pubblicato dalla Commissione degli operatori aerei rientranti nell'ambito di applicazione del *ReFuelEU Aviation* per il periodo di rendicontazione 2024). Il restante 26% di non conformità, riconducibile in larga misura a una limitata familiarità con le procedure di rendicontazione e alla minore dimensione delle realtà aziendali [15], sottolinea l'importanza cruciale del supporto tecnico fornito attraverso il portale EASA. La raccolta di questi dati d'altronde ha rivelato il livello di preparazione degli *stakeholder* in vista dei futuri obblighi normativi ed in particolare, come viene dichiarato nel documento, fatto emergere le aree in cui potrebbero essere necessari ulteriori chiarimenti e azioni di coordinamento per elevare la qualità e la completezza del *reporting* nei futuri cicli annuali [15].

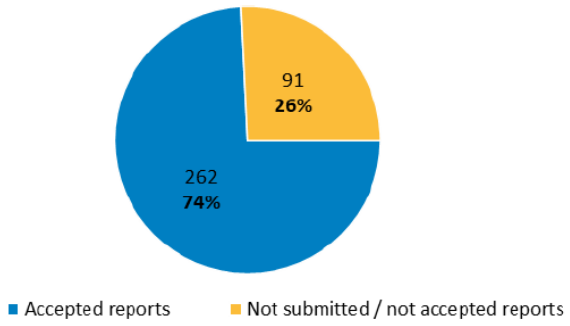


Figura 2.22 -Stato della rendicontazione degli operatori aerei.

Fonte: EASA (2025) [15].

"*EU SAF Clearing House*": l'hub scientifico propedeutico alla sandbox

L'anello di congiunzione più evidente verso un futuro ambiente di sperimentazione è la *EU SAF Clearing House*, un "*one-stop-shop*" scientifico lanciato pubblicamente dall'UE all'inizio del 2025 e gestito da un consorzio internazionale (tra cui EASA, Ricardo, Trinity College Dublin, Intertek, ENVISA e il Politecnico di Torino) [46].

Prima di poter ammettere un carburante innovativo all'interno di una regulatory sandbox per test operativi su vasta scala, è infatti essenziale dimostrare che la tecnologia possieda i requisiti minimi di sicurezza (come spiegato nel capitolo relativo alla teoria delle sandboxes).

La *Clearing House* assolve esattamente a questa funzione di filtro preventivo fungendo da forum virtuale per consulenze sulla qualità dei dati, sulle fasi di *testing* e sulla qualificazione dei SAF [46]. Infatti, operando su quattro pilastri [46] illustrati in Figura 2.23 ed elencati di seguito, la struttura supporta tecnicamente ed economicamente i produttori nelle fasi più critiche del primo sviluppo:

- pre-screening e guida all'approvazione ASTM D4054 per nuovi combustibili.
- supporto completo incluso di assistenza sui costi di sviluppo e produzione.
- valutazione di sostenibilità.
- promozione della crescita dei SAF.

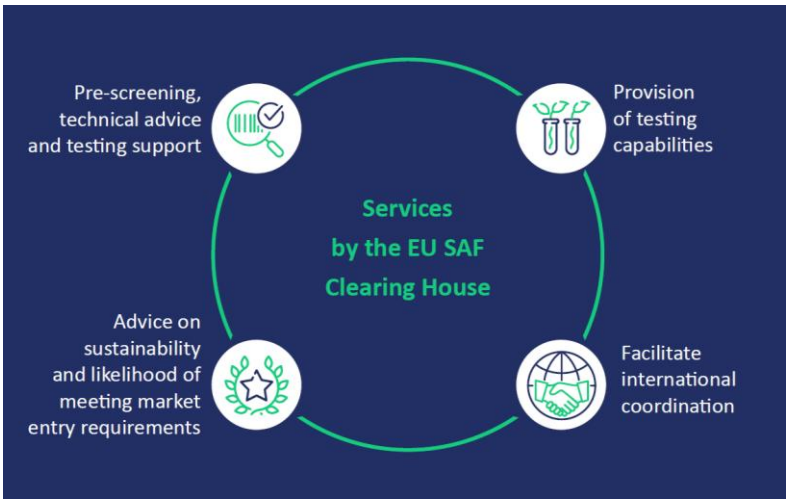


Figura 2.23 - Pilastri del servizio offerto dal EU SAF Clearing House.

Fonte: EU SAF Clearing House.

Come dichiarato sul sito web di Ricardo, nel corso del 2025 la *Clearing House* ha lanciato una campagna di standardizzazione mobilitando una rete globale di 14 centri di collaudo distribuiti tra UE, Regno Unito, USA e Asia per accelerare l'introduzione sul mercato di nuove tecnologie di produzione dei carburanti [46].

Ad oggi, aziende all'avanguardia come CATAGEN, Synhelion, Visolis e BTG Bioliquids hanno completato il pre-screening tecnico, mentre decine di altri produttori, come Liquid Sun e Metafuels, sono attualmente coinvolte in fasi diverse [46]. Sono proprio queste le aziende che, dopo aver dimostrato in questa fase di possedere una tecnologia sicura e conforme agli standard ASTM, diventeranno i candidati ideali per prendere parte ad una futura sandbox europea specifica per i SAF.

La sperimentazione aeroportuale distribuita e il "*Book & Claim*"

Parallelamente alla validazione scientifica dei carburanti, l'Europa sta preparando il terreno fisico e commerciale per i futuri test. Ad esempio, nel quadro delle iniziative europee volte a promuovere l'innovazione tecnologica e la transizione ecologica, è possibile presentare il progetto *Stargate.*

Selezionato dalla Commissione Europea nell'ambito del *Green Deal* (programma di ricerca e innovazione di un progetto più grande: *Horizon 2020*) e finanziato con 24,8 milioni di euro [47], *Stargate* rappresenta una risposta ambiziosa alle urgenti sfide climatiche che interessano il settore aereo.

Guidata dal *Brussels Airport* a capo di un consorzio multidisciplinare di 22 partner europei, la missione di questa iniziativa è sviluppare, testare e implementare una serie di soluzioni per rendere l'ecosistema aeroportuale significativamente più sostenibile, con l'obiettivo di trasformare gli aeroporti in veri e propri *hub* intermodali per la mobilità intelligente e verde entro il 2026 [47].

Stargate ha già attivato diverse iniziative concrete come:

- ***Bici condivise:*** dal 1° luglio 2025, in collaborazione con la Provincia del Brabante Fiammingo, i 30.000 dipendenti della comunità del *Brussels Airport* possono utilizzare biciclette condivise per gli spostamenti all'interno dell'area aeroportuale, riducendo i viaggi brevi e inquinanti [48].

- ***Condivisione di energia verde:*** il *Brussels Airport* ha avviato un progetto pilota con *Bolt* per condividere la propria produzione di energia fotovoltaica con un centinaio di famiglie di quattro comuni limitrofi [49].
- ***Pianificatore di viaggio:*** è stato sviluppato un sistema dedicato per ispirare i passeggeri e i dipendenti del *Brussels Airport* ad adottare mezzi di trasporto più ecologici [50].
- ***Studio sull'idrogeno:*** il consorzio sta portando avanti uno studio di fattibilità per l'implementazione di soluzioni di rifornimento di idrogeno gassoso in ambiente aeroportuale [51].

Il consorzio ha inoltre selezionato un team eterogeneo di attori (schematizzati in Figura 2.24) coinvolto nel "*SAF incentive programme"* con l'obiettivo di rendere possibile la miscelazione *on-site* dei SAF e allo stesso tempo di promuoverne il suo utilizzo negli aeroporti [52].

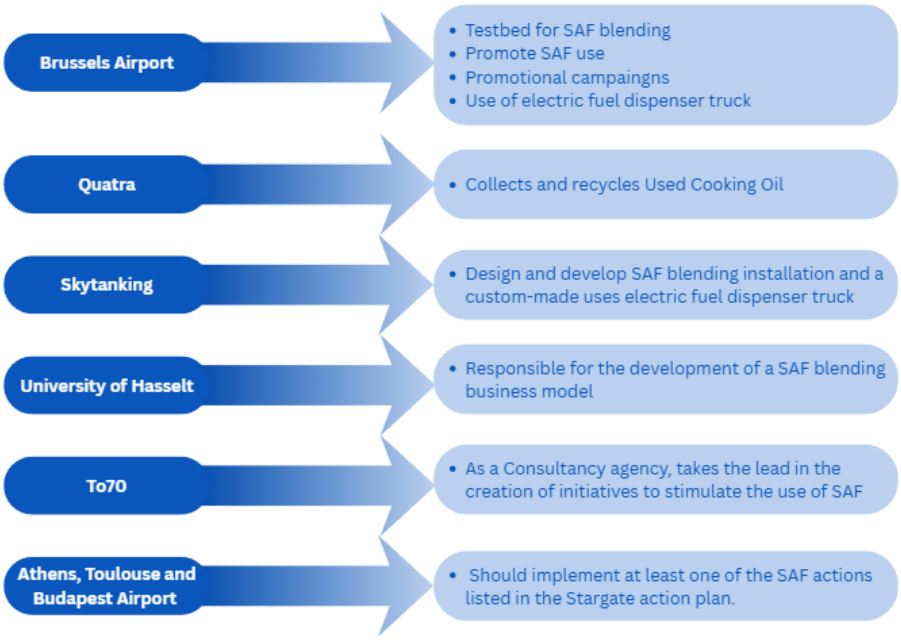


Figura 2.24 - Stargate SAF Working group.

Fonte: Sito web Strargate.

Dunque, se da un lato progetti gemelli (*sister projects*) europei come TULIPS, Stargate, OLGA [10] stanno trasformando gli aeroporti (inclusi Milano Malpensa, Roma Fiumicino e Torino) in "banchi di prova" distribuiti indispensabili per ospitare i futuri voli sperimentali in regime di deroga, dall'altro lato, per garantire la flessibilità economica necessaria a testare e scalare l'uso di questi nuovi carburanti, l'Europa dovrà esplorare l'introduzione di strumenti di deroga normativa in questo specifico ambito.

Come previsto dall'Articolo 15 del *ReFuelEU Aviation*, la Commissione Europea è stata incaricata di analizzare la fattibilità di un sistema di certificati negoziabili basato sul modello *Book and Claim* [16]. Tale meccanismo, fortemente richiesto dagli operatori, consentirebbe di separare l'acquisto fisico dei SAF dalle relative rivendicazioni ambientali, permettendo alle compagnie aeree di finanziare

l'innovazione ovunque essa avvenga, un'evoluzione che sarà oggetto dei futuri aggiornamenti normativi attesi entro la revisione generale del regolamento nel 2027 [16].

In conclusione, sebbene manchi ancora una deroga normativo temporanea specifica per i SAF, la sinergia tra la raccolta dati di EASA, il filtraggio tecnologico della *EU SAF Clearing House* e la preparazione infrastrutturale degli scali sta colmando il divario tra ricerca e applicazione, mettendo in atto tutti i passaggi intermedi necessari per rendere possibile, a breve termine, una sperimentazione legislativa e commerciale su scala comunitaria.

3 Analisi della filiera e mappatura degli stakeholder: i candidati per una regulatory sandbox nel mercato SAF

Il passaggio dai carburanti convenzionali (CAF) ai *Sustainable Aviation Fuels* (SAF) impone all'industria aeronautica una radicale riconfigurazione logistica. La filiera del cherosene di origine fossile è, infatti, storicamente consolidata: si muove dall'estrazione del greggio verso le macro-raffinerie e sfrutta reti di oleodotti ad alta efficienza per raggiungere direttamente i depositi aeroportuali [53]. Come è possibile osservare dalla **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** il cherosene fossile esce dalla raffineria come prodotto finito, certificato secondo lo standard internazionale ASTM D1655 e pronto per essere immesso nei serbatoi degli aerei.

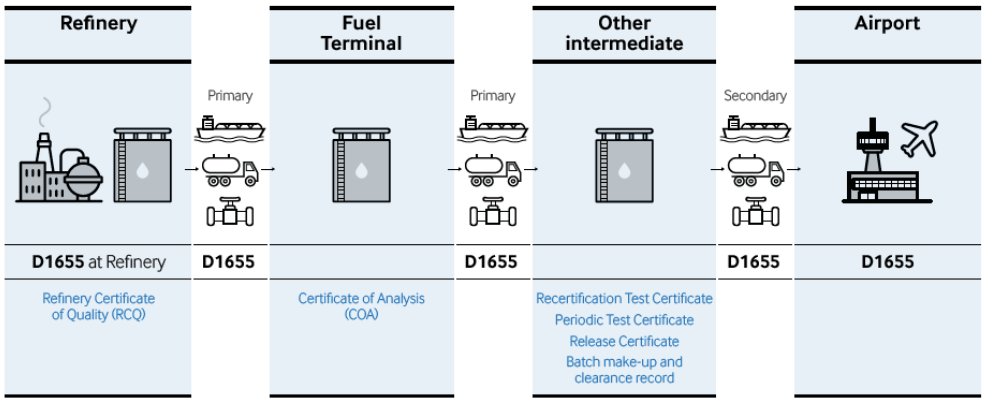


Figura 3.1 - Supply chain generica del carburante convenzionale per l'aviazione.

Fonte: ACI (2022) [53].

Al contrario, la *supply chain* dei SAF è intrinsecamente frammentata e decentralizzata [10]. In primo luogo, l'approvvigionamento dipende da una raccolta capillare di materie prime eterogenee [71] che richiedono complessi pretrattamenti prima di giungere alla sintesi chimica. Questo impone la necessità di strutturare reti di fornitura diffuse e ramificate sul territorio per poter aggregare i volumi necessari ad alimentare gli impianti [24].

Si assiste, inoltre, non solo a una **s**egmentazione delle fasi fisiche, ma anche a una parcellizzazione delle conoscenze tecnologiche [10]. Infatti, dal punto di vista chimico e tecnico, le competenze necessarie per produrre SAF appartengono a diverse nicchie specializzate dell'industria [10] generando una vera e propria dispersione del *know-how* lungo la catena del valore. Per risolvere questa asimmetria e riuscire a produrre il carburante, aziende di dimensioni e mercati diversi sono costrette ad allearsi e formare *joint venture* o partnership strutturate per integrare le proprie competenze complementari [10].

In secondo luogo, a differenza del cherosene tradizionale, il SAF puro appena sintetizzato (*neat SAF*) non è autorizzato a viaggiare all'interno degli oleodotti convenzionali [53]. In Europa infatti molte delle reti di oleodotti che riforniscono gli scali sono gestite dalla NATO, la quale non ha ancora concesso i permessi per il trasporto di questo nuovo carburante puro al loro interno [53].

Questo vincolo infrastrutturale spezza la linearità della distribuzione, rendendo obbligatori ulteriori e complessi passaggi logistici obbligatori come la miscelazione fisica (*blending*) con il carburante fossile

in raffineria o in terminali intermedi (vedi Figura 3.2), operazione indispensabile per ottenere la certificazione di carburante "drop-in" (secondo gli standard internazionali come l'ASTM D1655) ed essere impiegato negli aeromobili esistenti [10].

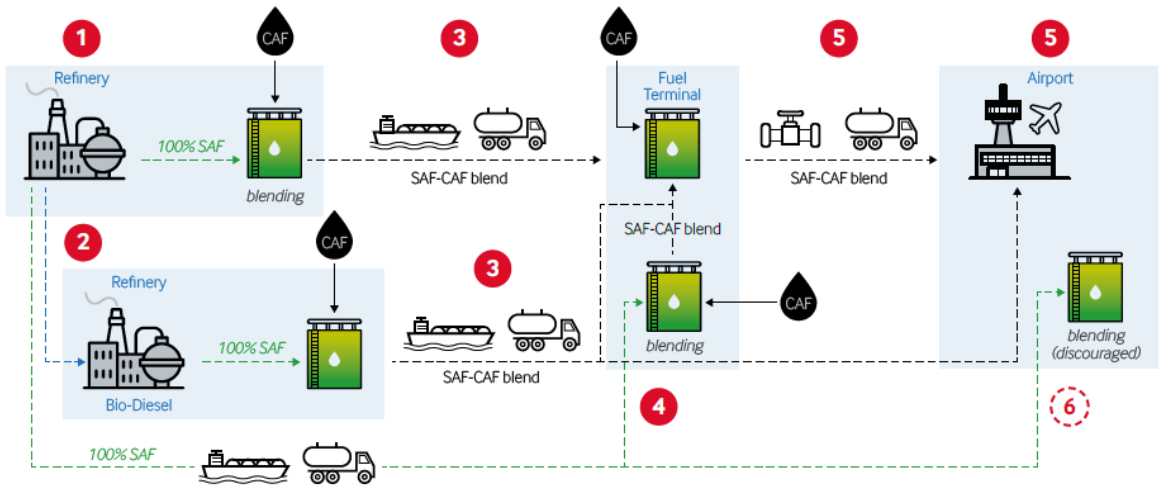


Figura 3.2-Percorso della miscela di SAF e CAF lungo la filiera.

Fonte: ACI (2022) [53].

Per analizzare nel dettaglio la complessità di questa architettura, la Tabella 2 che segue scompone l'intero ciclo logistico nelle sue macro fasi operative, ciascuna caratterizzata da specifici vincoli infrastrutturali e dall'intervento di attori ben definiti:

Fasi della supply chain	Stakeholder coinvolti
1) **Fase di prima conversione:** il ciclo ha inizio con la raccolta e il pretrattamento delle materie prime, le quali subiscono un primo processo di trasformazione chimica che può generare direttamente SAF puro (*neat SAF*) oppure fermarsi alla produzione di idrocarburi intermedi [38].	○ **Fornitori di feedstock (agricoltori, gestori di rifiuti)** ○ **Produttori di SAF (bioraffinerie): s**i fanno carico dell'intenso fabbisogno di capitale necessario alla costruzione degli impianti e assorbono i maggiori rischi tecnologici e di approvvigionamento legati a un mercato in via di sviluppo.
2) **Fase di raffinazione secondaria e completamento chimico:** qualora gli impianti di prima generazione producano esclusivamente oli intermedi, si rende necessario il loro trasferimento fisico verso complessi industriali più avanzati, capaci di ultimare la sintesi del carburante [38].	○ **Consorzi di bioraffinerie / partner tecnologici:** aziende con *know-how* complementari (es. esperti di produzione di alcol ed esperti di idrogenazione) collaborano tramite *joint venture* per completare la trasformazione del prodotto [10]. ○ **Enti di certificazione e Clearing Houses:** supportano i produttori garantendo che il carburante sintetizzato in questa fase superi i rigorosi iter di test necessari per l'approvazione tecnica.
3.a) Miscelazione alla fonte (In-Refinery Blending): se il sito di produzione è equipaggiato con le infrastrutture idonee e ha disponibilità di cherosene fossile convenzionale, il SAF puro può essere miscelato direttamente all'interno della bioraffineria. Sebbene questa opzione sia la più efficiente per trattare volumi massivi, essa fa lievitare i costi del successivo trasporto via terra verso le basi aeroportuali [10].	○ **Fornitori di carburante:** acquistano le quote verdi, le miscelano per ottenere un prodotto *drop-in* certificato e ne rispondono legalmente davanti alle istituzioni per il raggiungimento dei target vincolanti imposti da normative come il *ReFuelEU Aviation*.
3.b) Miscelazione intermedia presso snodi logistici (Fuel terminals): come valida alternativa alla miscelazione in raffineria, il SAF puro viene movimentato verso scali di stoccaggio intermedi indipendenti, dove viene unito al cherosene tradizionale [38]. Si	○ **Operatori della logistica:** le attuali reti di oleodotti multiprodotto non sono generalmente adatte al trasporto di SAF puro al 100% dunque questi soggetti devono impiegare flotte di navi, treni o autobotti per raggiungere i terminali [38].

tratta della configurazione logistica ottimale per alimentare in modo flessibile un network di aeroporti di dimensioni medie o piccole [10].	○ **Gestori dei depositi:** Mettono a disposizione le cisterne e i sistemi di pompaggio per conto dei fornitori [38].
4) Consegna e stoccaggio aeroportuale: una volta completata la miscelazione, il carburante è pronto per l'impiego e viene inviato ai depositi aeroportuali (*fuel farms*) per essere infine erogato a bordo degli aeromobili [38].	○ **Enti gestori degli aeroporti:** intervengono come facilitatori, dovendo assicurare che l'infrastruttura di terra non ostacoli l'erogazione dei SAF. ○ **Consorzi di gestione del carburante**: spesso formati da joint venture tra compagnie aeree e fornitori, gestiscono fisicamente lo stoccaggio e il rifornimento. ○ **Compagnie aeree: s**i fanno carico dell'onere economico del carburante sostenibile.
3.c) Miscelazione in aeroporto: una soluzione alternativa prevede l'arrivo del SAF puro direttamente in aeroporto per essere miscelato in loco. Tuttavia, la letteratura tecnica sconsiglia fortemente questa pratica perché i volumi gestiti sarebbero troppo bassi per giustificare gli elevatissimi costi legati alla costruzione di serbatoi e miscelatori segregati all'interno degli spazi aeroportuali già saturi [10].	○ **Enti gestori infrastrutturali e della logistica:** sono compresi l'ente gestore dell'aeroporto (*airport operator*), le società di logistica esterne incaricate del trasporto fisico del SAF puro, i consorzi dell'aviazione proprietari dell'infrastruttura convenzionale (*aviation fuel consortium*) e gli operatori diretti del deposito carburanti (*fuel farm operator*) [53]. ○ **Operatori di rampa e sicurezza:** include le società di assistenza a terra (*ground handling*), gli addetti materiali al rifornimento aereo (*aircraft refuelling operator*) e, soprattutto, le squadre di soccorso e antincendio dell'aeroporto (*fire and rescue teams*) [38]. ○ **Attori commerciali e contrattuali:** raggruppa i contraenti diretti della transazione economica, ovvero il fornitore del carburante sostenibile (*SAF supplier*) e le compagnie aeree acquirenti (*airlines*). ○ **Istituzioni, enti di controllo e verificatori:** come i dipartimenti locali dei trasporti, le Agenzie Ambientali, le autorità doganali (indispensabili per la complessa gestione di dazi e accise legati all'importazione del nuovo carburante) e le Organizzazioni Non Governative (ONG) per validare la filiera e garantire che non si verifichino doppi conteggi (*double counting*) dei benefici emissivi [53].

Tabella 2- Supply chain generica per l'approvvigionamento di SAF.

In ciascuna delle fasi appena illustrate operano specifici attori (fornitori di materie prime, bioraffinerie, compagnie aeree e gestori aeroportuali) che si fanno carico di quote diverse di rischio industriale, normativo e finanziario. Gli *stakeholder* che verranno analizzati nel presente capitolo non rappresentano, quindi, solamente i nodi logistici della catena di approvvigionamento, ma costituiscono i veri protagonisti su cui andranno "cuciti" su misura i futuri strumenti economici di *policy*.

Sulla base delle caratteristiche e delle vulnerabilità di ciascun soggetto, come l'elevato fabbisogno di capitale per i produttori o l'onere del "*green premium"* a carico dei vettori aerei, i decisori politici dovranno calibrare incentivi specifici. Tali misure includono, ad esempio, i Contratti per Differenza (CfD) per stabilizzare i prezzi di produzione e i sistemi contabili virtuali come il *Book and Claim* per semplificare le transazioni e abbattere i costi logistici per le compagnie aeree [10]. Infine, per validare l'efficacia commerciale di questi meccanismi senza esporre il delicato mercato dell'aviazione a distorsioni o rischi sistemici, l'interazione tra questi attori e i nuovi strumenti finanziari dovrà essere testata e monitorata all'interno di un ambiente normativo controllato, ovvero attraverso l'implementazione di una *regulatory sandbox* a livello nazionale.

Alla luce di questa premessa strutturale, i capitoli seguenti delineano singolarmente i profili, le criticità e le iniziative dei principali stakeholder operanti nel contesto italiano.

3.1 Offerta: produttori e fornitori di SAF

L'analisi dell'offerta nazionale di carburanti sostenibili per l'aviazione richiede, in via preliminare, l'adozione di una rigorosa tassonomia dei soggetti operanti sul mercato. Al fine di chiarire il perimetro normativo, l'EASA riassume la definizione e le istruzioni operative per i fornitori di carburante all'interno della Figura 3.3 riportata nell'*Annual Technical Report 2025*. Nel documento, il fornitore di carburante per l'aviazione (*Aviation Fuel Supplier* o AFS) è definito esplicitamente come il soggetto che fornisce fisicamente "*carburante o idrogeno per l'aviazione presso un aeroporto dell'Unione*" (Figura 3.3) [15].

	Description
Definition	As per **Article 3.19**, *'aviation fuel supplier' means a 'fuel supplier' as defined in Article 2, second paragraph, point (38), of Directive (EU) 2018/2001, supplying aviation fuel or hydrogen for aviation at a Union airport.*
Scope list	List of aviation fuel suppliers in scope of the Regulation.[14]
Obligations	**Article 4** mandates that aviation fuel suppliers ensure that all aviation fuel made available to aircraft operators at each Union airport contains gradually increasing minimum shares of SAF, starting in 2025. As an exception, an aviation fuel supplier may, from 01 January 2025 until 31 December 2034, supply the minimum shares of SAF as a weighted average over all the aviation fuel it supplies across Union airports for a given reporting period. This is referred to as the "flexibility mechanism".
Reporting process	As per **Article 10**, aviation fuel suppliers are required to submit to the Union Database, by 14 February each year, information on SAF and aviation fuel supplied during the reporting period, including the amounts and characteristics of that SAF and aviation fuel.
Supporting documents	• Template for aviation fuel suppliers' reporting on SAF sustainability characteristics and aviation fuel supplied • Template for aviation fuel suppliers' reporting on aviation fuel quality

Figura 3.3- Obblighi della ReFuelEU Aviation per i fornitori di carburante per l'aviazione.

Fonte: EASA (2025) [15].

Nell'analisi del mercato nazionale, è fondamentale operare una netta distinzione tra la produzione industriale e la sua successiva fornitura commerciale in aeroporto. Osservando la lista ufficiale pubblicata dall'EASA relativa agli *Aviation Fuel Suppliers* soggetti agli obblighi di rendicontazione per il 2025 (vedi Figura 3.4), emerge come il mercato italiano della fornitura sia caratterizzato da una pluralità di attori. L'elenco comprende, infatti, non solo l'operatore nazionale Eni (tramite *Enilive*), ma anche le filiali italiane delle grandi *oil majors* internazionali (come Air B.P. Italia, Kuwait Petroleum Italia, Tamoil Italia, TotalEnergies Marketing Italia) e operatori specializzati nella logistica petrolifera (come Nautilus Aviation, Jenergy e World Fuel Services).

ITALY	
Aviation fuel suppliers	*Principal place of business*
AIR B.P. ITALIA S.P.A.	ITALY
ALOA S.R.L.	ITALY
ENI S.P.A.	ITALY
ENILIVE S.P.A.[8]	ITALY
ESE S.R.L.	ITALY
JENERGY S.P.A.	ITALY
LUDOIL ENERGIA S.R.L	ITALY
KUWAITPETROLEUM ITALIA S.P.A.	ITALY
NAUTILUS AVIATION S.P.A.	ITALY
TAG BOLOGNA S.R.L.	ITALY
TAMOIL ITALIA S.P.A.	ITALY
TOTALENERGIES MARKETING ITALIA S.P.A.	ITALY
WORLD FUEL SERVICES ITALY S.R.L.	ITALY

Figura 3.4-Lista dei fornitori di carburante aereo soggetti agli obblighi del regolamento ReFuelEU Aviation per il periodo di rendicontazione 2025.

Fonte: EASA (2025) [15].

Questi soggetti, in qualità di fornitori (AFS), sono i responsabili legali dell'assolvimento dell'obbligo di miscelazione imposto dal *ReFuelEU Aviation* [16]. Tuttavia, la frammentazione del mercato a valle (la fornitura) si contrappone a una fortissima concentrazione del mercato a monte (la produzione). La maggior parte degli *Aviation Fuel Suppliers* operanti in Italia, infatti, non possiede impianti di bioraffinazione sul territorio nazionale [64]. Essi invece operano acquistando le quote di SAF puro sul mercato all'ingrosso, ad esempio, approvvigionandosi direttamente da produttori esteri o dall'unico grande produttore locale, per poi procedere alle operazioni di *blending* e alla vendita finale alle compagnie aeree.

Monopolio produttivo sul suolo nazionale e il modello di business di Eni

Se il mercato della vendita finale appare plurale, il panorama dell'offerta industriale si presenta invece trainato da un monopolio di fatto per quanto concerne la sintesi fisica del carburante sul territorio italiano, guidato dal gruppo Eni (attraverso la società dedicata alla mobilità sostenibile, *Enilive*). L'azienda energetica italiana opera come entità verticalmente integrata, possedendo sia le bioraffinerie dove avviene la sintesi chimica, sia l'infrastruttura per agire parallelamente come fornitore diretto [55].

Per affrontare l'incertezza sui rendimenti futuri e garantire la bancabilità dei progetti a fronte degli altissimi costi di investimento (CAPEX), Eni ha adottato un approccio finanziario e industriale definito "*modello satellitare*" mostrato in Figura 3.5 [55]. Attraverso la costituzione di entità dedicate e finanziariamente indipendenti, come *Enilive* per la mobilità sostenibile, l'azienda è in grado di attrarre capitali specializzati per accelerare la crescita infrastrutturale e la transizione verso la neutralità carbonica (*Net Zero*) al 2050 [55].

A conferma del valore della società e dell'importanza dello sviluppo di partnership, nel 2025 il fondo di investimento globale KKR ha incrementato al 30% la propria partecipazione in *Enilive*, iniettando

capitali vitali per lo sviluppo infrastrutturale [54] . Nel solo 2025, Eni ha stanziato 207 milioni di euro in Ricerca e Sviluppo, destinandone l'80% a tecnologie per la riduzione dell'impronta carbonica [55].

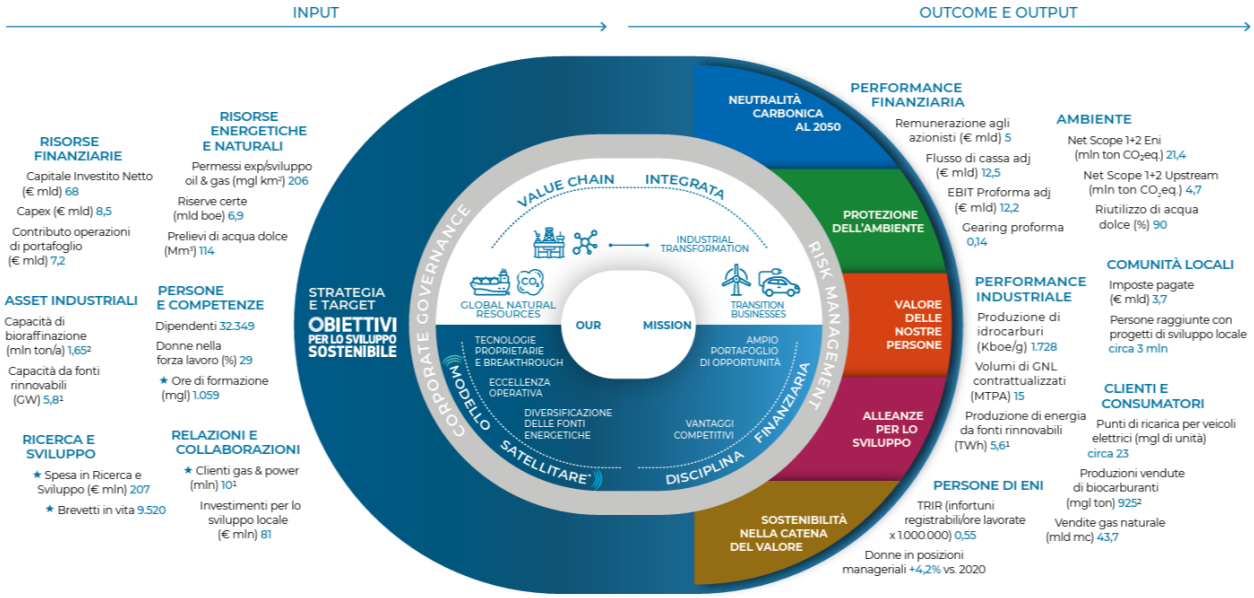


Figura 3.5- Modello di business di ENI.

Fonte: ENI for a Just transition (2025) [55].

L'allocazione del rischio a carico dei produttori e fornitori

Come già delineato nel secondo capitolo, all'interno del quale sono state trattate in chiave generale le sfide e le barriere legate alla filiera dei SAF, operare in un mercato nascente e ad alta intensità di capitale comporta incertezze strutturali molto elevate. Calando questa dinamica nel contesto specifico dell'offerta nazionale, secondo il World Economic Forum (2025) i produttori italiani sono attualmente esposti ad un triplice profilo di rischio [23]:

- ***Rischio Tecnologico (Technology risk):***

  riguarda le sfide ingegneristiche legate alla maturità degli impianti. Sebbene tecnologie come l'HEFA siano commercialmente mature, la costruzione di impianti *First-of-a-Kind* (FOAK) per nuove filiere (come l'Alcohol-to-Jet o i SAF sintetici/e-fuels) comporta enormi rischi di *scale-up* industriale e costi operativi iniziali difficilmente stimabili [23].

- ***Rischio di Mercato (Market risk):***

  è legato alla forte volatilità dei prezzi dei SAF e all'incertezza sui rendimenti futuri. La mancanza di strutture a prezzo fisso e l'assenza di un numero sufficiente di contratti di acquisto a lungo termine (*off-take*) rendono complessa la bancabilità dei progetti e l'ammortamento degli altissimi costi di investimento iniziali (CAPEX) [23].

- ***Rischio legato alle materie prime (Feedstock risk):***

  rappresenta la criticità maggiore nel breve termine. I produttori devono affrontare la forte volatilità dei prezzi degli scarti lipidici (come gli oli da cucina esausti) e la competizione

intersettoriale [10]. Attualmente, infatti, le bioraffinerie italiane producono principalmente HVO (biodiesel per il trasporto stradale) che insiste sullo stesso bacino di materie prime necessario per l'HEFA aeronautico [10]. Inoltre, l'Italia risulta fortemente dipendente dalle importazioni extracomunitarie (es. da Malesia o Indonesia) per soddisfare il proprio fabbisogno di UCO (vedi Figura 3.6) [55].

Paese	Tipologia	Feedstock Venezia+Gela (ton)[a]
Italia	Oli vegetali[d]	3.182
Africa[b]		6.960
Europa		2.421
Altro[c]		16.831
Indonesia	Rifiuti e residui (oli vegetali esausti, residui oleosi derivanti da lavorazioni di oli vegetali e altri processi industriali)	307.445
Malesia		243.562
Italia		26.731
Africa		8.378
Europa		19.344
Altro		90.789

(a) Feedstock relativi alle produzioni vendute certificate sostenibili con Proof Of Sustainability (POS, come previsto dagli schemi di certificazione).
(b) Kenya, Tanzania, Sudafrica.
(c) Australia, Canada, Indonesia, Kazakistan.
(d) Ad esempio canola, croton, ricino, soia.

Figura 3.6- Biofeedstock utilizzati nelle bioraffinerie Enilive in italia (anno 2025).

Fonte: ENI for a Just transition (2025) [55].

La transizione verso una produzione su larga scala di biocarburanti per l'aviazione impone dunque agli operatori industriali di confrontarsi con un quadro di incertezze strutturali. Tuttavia, i principali *player* del mercato come ENI sono pienamente consapevoli dell'entità dei rischi appena descritti (di mercato, tecnologici e di approvvigionamento) e stanno rispondendo in modo proattivo, integrando complessi meccanismi di mitigazione direttamente all'interno dei propri modelli di business aziendali come quelli presentati di seguito.

Mitigazione del rischio tecnologico: il network delle bioraffinerie in Italia

L'estensione della vita utile e la riconversione degli asset tradizionali della raffinazione petrolifera già esistenti (come nel caso dei siti di Gela, Venezia e Livorno) rappresentano la leva operativa centrale di Eni [55]. La traduzione fisica di questa strategia di investimenti si articola su una rete di poli industriali in continua espansione sul territorio nazionale. Riprendendo la panoramica introdotta nel primo capitolo, è opportuno scendere nel dettaglio delle singole infrastrutture per quantificare l'offerta reale. Attualmente, l'architettura produttiva si fonda su due sole bioraffinerie pienamente operative (Figura 3.7), a cui si affiancheranno nel breve e medio termine i poli in fase di riconversione.

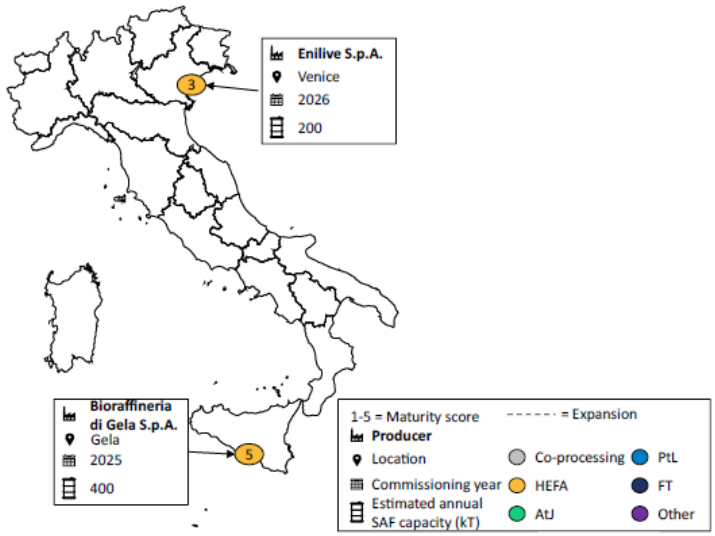


Figura 3.7 - Mappa dei produttori di SAF in Italia nel 2025.

Fonte: EASA (2025).

La Tabella 3 offre una mappatura completa di tali impianti, illustrandone l'anno di entrata in esercizio e i volumi di capacità produttiva totale dedicata al SAF:

Città	***Regione***	***Status***	***Anno di avvio***	***Capacità tot di lavorazione*** *(ton/anno)*	***Opzionalità SAF***
Gela	Sicilia	Operativa	2025	736.000	Fino a 400.000
Porto Marghera	Venezia	Operativa	2014	400.000	in fase di potenziamento
Livorno	Toscana	In conversione	2026	500.000	N/D
Sannazzaro de' Burgondi	Lombardia	In conversione parziale	2028	550.000	N/D
Priolo	Sicilia	In sviluppo	2028	500.000	N/D

Tabella 3 - Mappatura della capacità di bioraffinazione e produzione SAF di Eni in Italia (Dati aggiornati al 2026).

Fonte: ICAO Tracker SAF facilities [13].

Nel report di sostenibilità "*Eni for 2025"*, viene dichiarata dalla società una capacità di lavorazione di materie prime rinnovabili pari a 1,65 milioni di tonnellate all'anno, con l'obiettivo strategico di raggiungere i 5 milioni di tonnellate entro il 2030 (come mostrato in Figura 3.8) [55]. All'interno di tale perimetro, l'azienda dedicherà una quota produttiva al SAF-biojet superiore ai 2 milioni di tonnellate annue entro il 2030 [55].

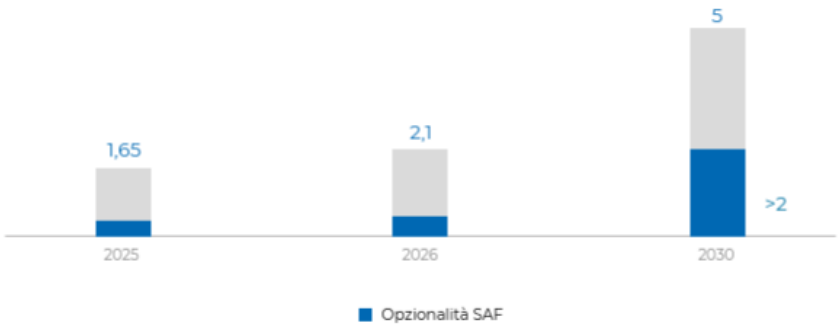


Figura 3.8- Capacità di bioraffinazione e opzionalità SAF (MTPA).

Fonte: ENI for a Just transition (2025) [55].

Mitigazione del rischio di mercato: collaborazioni e *off-take agreements*

Sul fronte commerciale, il rischio viene mitigato condividendolo con i consumatori finali: *Enilive* opera stipulando accordi di fornitura a lungo termine (*off-take agreements*) con le principali compagnie aeree, garantendosi così flussi di cassa stabili e prevedibili. Nel 2025 sono state consolidate alleanze strategiche di grande rilievo per il mercato italiano:

- **easyJet:** lettera di Intenti per circa 30.000 tonnellate di SAF-biojet destinato agli scali italiani [55].
- **Volotea:** accordo per 15 scali italiani, per l'erogazione fino a 15 milioni di litri di SAF tra il 2025 e il 2030 [55].
- **Ryanair:** intesa commerciale per l'erogazione di volumi di SAF fino a 100.000 tonnellate nel periodo 2025-2030 [55].
- **Poste Italiane:** fornitura di SAF per la flotta aerea della divisione logistica [55].

Mitigazione del rischio feedstock: l'integrazione verticale e il progetto "*Agri-Feedstock*"

Per contrastare la forte volatilità dei prezzi e la limitata disponibilità degli scarti lipidici, Eni sta implementando un modello di integrazione verticale *end-to-end* [55]. Nel 2025, per garantire la sostenibilità ambientale, oltre il 95% delle materie prime che hanno alimentato le bioraffinerie di Venezia e Gela è stato costituito da rifiuti e residui, tra cui oli esausti da cucina (UCO) e grassi animali [55]. Tuttavia, per assicurare l'approvvigionamento di volumi stabili e crescenti senza entrare in competizione con la filiera alimentare, l'azienda ha sviluppato una rete internazionale "*Agri-feedstock*" proprietaria [55] di cui viene fornita una panoramica in Figura 3.9. Come dichiarato dall'azienda stessa: "*Lo sviluppo della filiera agri-feedstock rappresenta un elemento complementare alla crescita delle attività di bioraffinazione di Eni, contribuendo a garantire e diversificare l'approvvigionamento di materie prime per la produzione di biocarburanti"* [55].

Questo modello si fonda sulla coltivazione di terreni degradati, colture di rotazione e sulla valorizzazione di scarti agroindustriali in numerosi paesi tra cui Kenya, Congo, Costa d'Avorio, Angola e Mozambico [55]. I semi e i residui vengono lavorati localmente in appositi "*Agri Hub"*, e l'intera filiera è

rigorosamente certificata secondo lo schema di sostenibilità ISCC-EU (riconosciuto dalla direttiva europea RED III) [55]. Nel 2025, la produzione proveniente da queste filiere ha raggiunto le 211.000 tonnellate (registrando un +62% rispetto al 2024), con l'obiettivo strategico di traguardare circa 1 milione di tonnellate entro il 2030 [55].

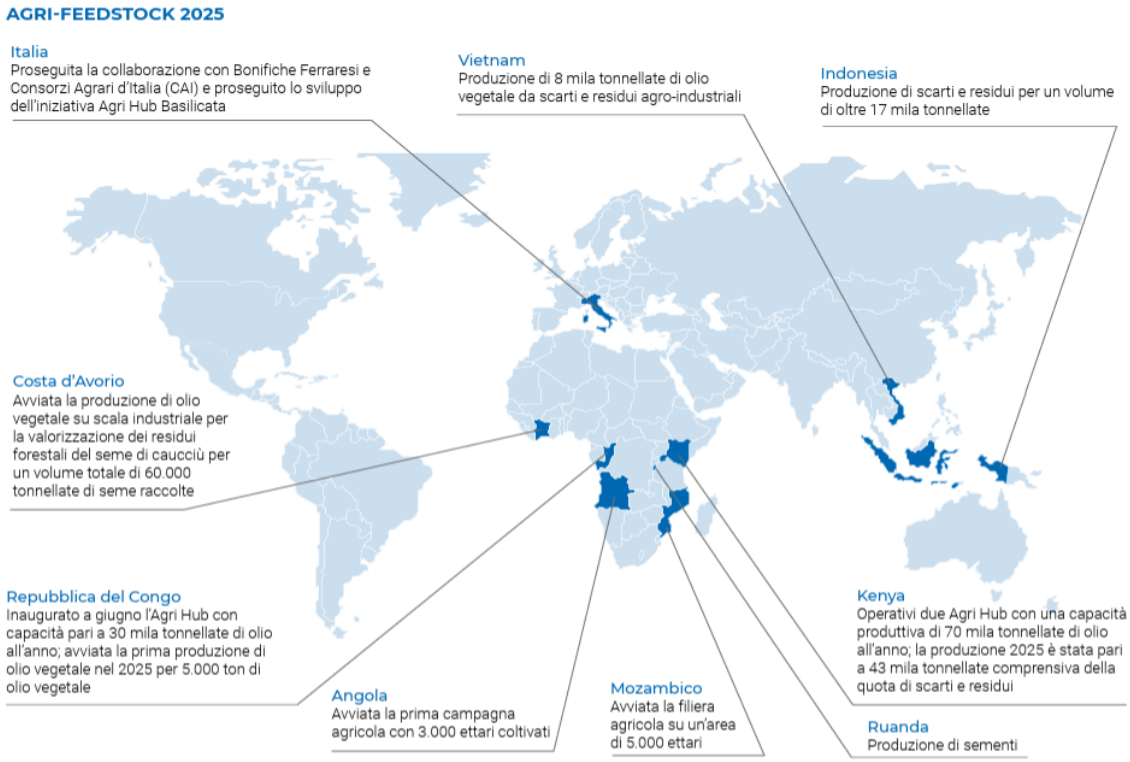


Figura 3.9- Agri-feedstock 2025.

Fonte: ENI for a Just transition (2025) [55].

A conclusione dell'analisi inerente all'offerta nazionale e alle dinamiche di allocazione del rischio, risulta opportuno sintetizzare il quadro strategico e manageriale finora delineato. Al fine di fornire una visione d'insieme chiara e immediata di come il principale *player* industriale italiano stia affrontando le incertezze del mercato nascente dei SAF, la Tabella 4 mette a sistema le tre categorie di rischio strutturale (tecnologico, legato alle materie prime e di mercato) affiancandole alle specifiche leve di mitigazione implementate da Eni.

Rischio affrontato	**Strumenti di mitigazione**	**Livello di maturità**
Rischio tecnologico • Costi operativi: sono difficilmente stimabili per impianti FOAK • Difficoltà di scale-up	Riconversione, riqualificazione ed estensione della vita utile degli asset di raffinazione tradizionali già esistenti	Pienamente Operativo

Rischio legato ai *feedstock* • Forte volatilità dei prezzi degli scarti lipidici • Dipendenza dalle importazioni extracomunitarie • Competizione intersettoriale	Sviluppo della rete internazionale "*Agri-feedstock*"	Pienamente Operativo
Rischio di mercato • Critica bancabilità dei progetti e rendimenti futuri incerti	Accordi a lungo termine per garantire l'assorbimento dell'offerta prodotta in Italia	Pienamente Operativo

Tabella 4- Tabella riassuntiva rischio-mitigazione.

3.2 Hub logistici: gestori aeroportuali

Nella complessa architettura del mercato dei biocarburanti, le infrastrutture aeroportuali non agiscono in qualità di acquirenti diretti del carburante per i voli, ma ricoprono il ruolo fondamentale di facilitatori logistici, rappresentando il punto di incontro fisico tra i fornitori e le compagnie aeree.

Il Regolamento europeo *ReFuelEU Aviation* interviene direttamente anche su questi *stakeholder*. Per evitare di gravare eccessivamente sui piccoli scali regionali, la normativa definisce come "Aeroporti dell'Unione" (*Union Airports*) esclusivamente le infrastrutture che, nel periodo di rendicontazione precedente, hanno registrato un traffico superiore a 800.000 passeggeri oppure un traffico merci superiore a 100.000 tonnellate [15] come riportato in Figura 3.10.

	Description
Definition	As per **Article 3.1**, *'Union airport' means an 'airport' as defined in Article 2, point (1), of Directive 2009/12/EC of the European Parliament and of the Council (12) where passenger traffic was higher than 800 000 passengers or where the freight traffic was higher than 100 000 tonnes in the previous reporting period, and which is not situated in an outermost region, as listed in Article 349 TFEU.*
Scope list	List of Union airports in-scope of the Regulation.
Obligations	**Article 6** mandates Union airport managing bodies to facilitate the access to SAF. **Article 7** mandates Union airport managing bodies to report actions taken to facilitate the access of aircraft operators to hydrogen or electricity used primarily for the propulsion of an aircraft and to provide the infrastructure and services necessary for the delivery, storage and uplifting of such hydrogen or electricity to refuel or recharge aircraft.
Reporting process	Union airport managing bodies are required to submit their reports to the National Competent Authorities via the EASA Sustainability Portal.
Supporting documents	-

Figura 3.10- Obblighi della ReFuelEU Aviation per gli aeroporti.

Fonte: EASA (2025) [15].

Calando questo perimetro nel contesto nazionale, la lista ufficiale pubblicata dalla Commissione Europea relativa agli scali inclusi nell'ambito di applicazione (*in-scope*) per il periodo di rendicontazione del 2024 individua esattamente 23 aeroporti italiani soggetti agli obblighi del Regolamento. L'elenco (in Figura 3.11) comprende i maggiori hub intercontinentali, come Roma Fiumicino e Milano Malpensa, estendendosi capillarmente ai principali scali regionali e cittadini da Nord a Sud, inclusi aeroporti come Milano Bergamo, Venezia, Napoli, Bologna, Torino, Firenze, Genova, oltre ai grandi nodi insulari come Catania, Palermo, Cagliari e Olbia.

ITALY	
ICAO Code	*Airport Name*
LIEA	Alghero
LIRQ	Firenze-Peretola
LIBD	Bari
LIME	Milan Bergamo
LIPE	Bologna
LIBR	Brindisi
LICC	Catania–Fontanarossa
LIRA	Ciampino
LIEE	Elmas
LIMJ	Genova
LICA	Lamezia Terme
LIML	Milano Linate
LIMC	Milano Malpensa
LIRN	Napoli-Capodichino
LIEO	Olbia
LICJ	Palermo
LIRP	Pisa
LIRF	Roma Fiumicino
LIMF	Torino
LICT	Trapani-Birgi
LIPH	Treviso
LIPZ	Venezia
LIPX	Verona Villafranca

Figura 3.11- Lista degli aeroporti italiani nell'ambito di applicazione della ReFuelEU Aviation per il periodo di rendicontazione del 2024.

Fonte: EASA (2025) [15].

Modello di proprietà e di accesso alle infrastrutture di stoccaggio aeroportuali

Dal punto di vista prettamente infrastrutturale, l'integrazione del SAF impone sfide rilevanti. Essendo carburanti di tipo *drop-in*, l'approccio più efficiente ed economicamente sostenibile prevede che il SAF arrivi all'aeroporto già miscelato, in modo da poter essere stoccato nei depositi esistenti (*fuel farms*) e distribuito tramite la normale rete di idranti senza richiedere serbatoi separati (vedi Figura 3.12) [10].

Tuttavia, un aspetto critico sollevato dagli operatori del settore, e in particolare dalla IATA, è il modello di proprietà e di accesso alle infrastrutture di stoccaggio aeroportuali, il quale determina strutturalmente il livello di concorrenza e il prezzo finale del carburante [56].

Secondo le analisi della IATA, i modelli di gestione si dividono sostanzialmente in due macrocategorie con impatti diametralmente opposti sulla fornitura di SAF:

- **Infrastrutture ad "accesso aperto" (*Open access*):** si verificano quando i depositi sono gestiti da una terza parte indipendente (un ente governativo o un privato non coinvolto nella vendita di carburante) o da un consorzio di compagnie aeree [56]. L'assenza di conflitti di interesse in questo modello consente a qualsiasi fornitore, compresi i nuovi produttori di SAF, di stoccare il proprio carburante nei depositi a tariffe trasparenti [56]. Questa configurazione favorisce la competizione sui prezzi, riduce i costi logistici e facilita l'approvvigionamento capillare dei biocarburanti [56].
- **Infrastrutture ad "accesso ristretto" (*Restricted access*):** si configurano quando i depositi sono di proprietà di un singolo fornitore o di una *joint venture* chiusa di fornitori storici, il cui *core*

business è la vendita di carburante [56]. In questo scenario si genera un conflitto di interessi logistico: i proprietari dell'infrastruttura possono imporre tariffe di stoccaggio sproporzionate o negare l'accesso ai nuovi produttori di SAF concorrenti [56]. Questo modello monopolistico o oligopolistico crea barriere all'ingresso insormontabili, gonfiando ulteriormente i prezzi del SAF e penalizzando la competitività a lungo termine dello scalo [56].

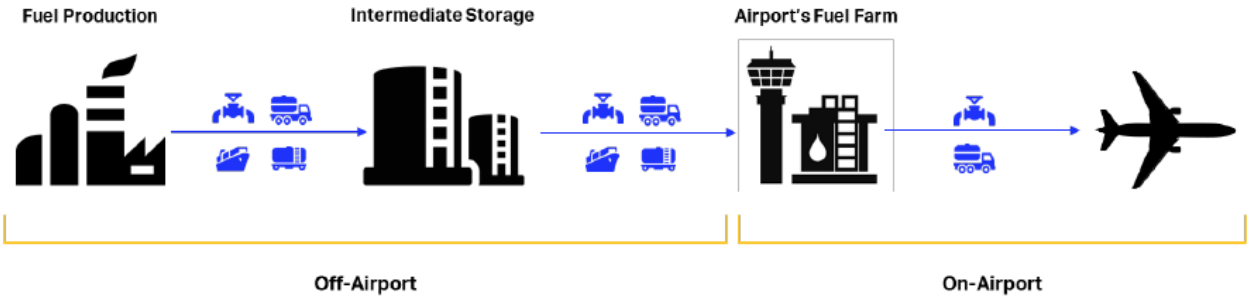


Figura 3.12- Supply chain dei carburanti per l'aviazione.

Fonte: IATA Sustainability and Economics [56].

Secondo un'indagine globale condotta dalla IATA (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**), il 59% dei maggiori aeroporti presenta forme di accesso "ristretto" alle proprie infrastrutture [56]. La risoluzione di questi monopoli infrastrutturali è una strategia fondamentale per mitigare il rischio di investimento nella produzione di SAF e abbatterne il sovrapprezzo commerciale.

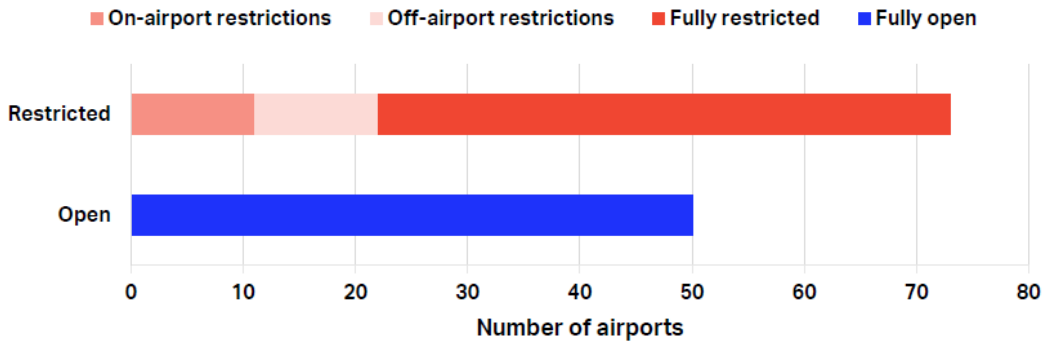


Figura 3.13- Distribuzione complessiva della tipologia di accesso alle infrastrutture di rifornimento all'interno di un campione di 123 aeroporti.

Fonte: IATA [56].

L'allocazione del rischio a carico delle infrastrutture aeroportuali

Sebbene gli scali aeroportuali, come precedentemente illustrato, agiscano primariamente in qualità di facilitatori logistici e non figurino tra gli acquirenti diretti del biocarburante, il loro ruolo di snodo critico della *supply chain* li espone a una serie di vulnerabilità strategiche e operative di primaria importanza. L'implementazione dei mandati europei e la necessaria riorganizzazione logistica riversano infatti sui gestori aeroportuali impatti diretti, che rischiano di comprometterne la competitività e l'efficienza.

È possibile mappare il profilo di rischio degli aeroporti in quattro macro-categorie strutturali:

- ***Rischio di competitività e "hub shifting":***
  gli aeroporti europei, a causa degli stringenti obblighi normativi imposti dal pacchetto *Fit for 55* e dal *ReFuelEU Aviation*, rischiano una grave perdita di competitività rispetto agli scali di altre aree geografiche non soggette ai medesimi oneri [10]. L'inevitabile aumento dei costi operativi legato all'adozione dei SAF, se trasferito sul prezzo dei biglietti, potrebbe spingere i passeggeri a optare per scali ed hub extra-europei (fenomeno noto come *hub shifting*) [10]. Come evidenziato da uno studio commissionato da ACI Europe, questa ridistribuzione dei flussi di traffico a discapito degli scali dell'Unione non porterebbe a una riduzione reale delle emissioni (generando invece il cosiddetto "*carbon leakage"*), ma colpirebbe in modo severo soprattutto l'economia dei piccoli aeroporti regionali fortemente legati al traffico intra-europeo [10].

- ***Rischio di accesso alle infrastrutture (monopoli logistici):***
  se l'infrastruttura di un aeroporto è ad accesso ristretto, i nuovi produttori di SAF incontrano insormontabili barriere all'ingresso [56]. Inoltre, la mancanza di concorrenza si traduce in prezzi del SAF nettamente più elevati in quello specifico scalo, penalizzandone la connettività di lungo periodo rispetto ad aeroporti dotati di modelli ad "accesso aperto" (*open access*) [56].

- ***Rischio logistico legato alle operazioni di miscelazione:***
  affinché il sistema logistico risulti economicamente e tecnicamente sostenibile, il SAF deve arrivare all'aeroporto già miscelato con il cherosene fossile [10]. Qualora le difficoltà di approvvigionamento costringessero gli aeroporti a effettuare le operazioni di miscelazione (*blending*) direttamente in loco, gli scali andrebbero incontro a enormi criticità spaziali ed economiche. Per realizzare il *blending* in aeroporto, infatti, i gestori dovrebbero costruire e mantenere serbatoi separati (uno per il 100% SAF e uno per il mix), installare impianti di miscelazione e allestire laboratori di test per la certificazione della qualità del carburante (vedi Figura 3.14) [38]. Tali oneri infrastrutturali risulterebbero insostenibili per la maggior parte degli scali, confermando che i siti idonei al *blending* rimangono le raffinerie e i grandi terminali di stoccaggio industriali.

Advantages	Disadvantages	Limitations
Fewer trucks for SAF are needed. (1 truck with 100% SAF vs 3 trucks with 30% SAF)	Requires airport infrastructure to receive, store, and blend the fuel	Trucks required for SAF transport if 100% SAF is not permitted in the pipeline (this is the case now), restricting delivery volumes
Reduced transportation costs [12] [44]	Requires duplication of fuel supply chains all the way through to the airport	Airport tank storage capacity is small compared to other locations [43] [44]
Increases visibility and presence of SAF to airport workforce	Certification of fuel needs to happen on-site [13]	Regulations for blending on-site would be required [28] [12] – Lack of expertise in certification requirements
	Ground traffic congestion [13]	Limited fuel can be offloaded via existing offload racks
		Lack of Legal framework to transport 100% SAF in some countries

Figura 3.14- Considerazioni in merito alla miscelazione effettuata in aeroporto.

Fonte: ACI (2022) [38].

- ***Rischio di frodi e qualità del carburante:***
  il report annuale dell'EASA (2025) solleva un ulteriore elemento critico di natura tecnica e legata alla sicurezza (*safety*). Man mano che cresce su larga scala l'adozione di carburanti sintetici o biologici aumenta per gli aeroporti il rischio di vedersi consegnare partite di carburante "fuori specifica", ovvero miscele che non rispettano i rigorosi standard di qualità chimica (ASTM D7566) [15]. La complessità dei processi di sintesi e, soprattutto, l'enorme differenziale di prezzo tra il SAF e il jet fuel fossile, potrebbero incentivare attività fraudolente lungo la *supply chain*, scaricando in ultima istanza sui gestori aeroportuali e sugli operatori aerei i rischi operativi legati all'immissione in rete di carburante non idoneo [15].

Mitigazione del rischio competitivo e logistico: modelli di incentivazione e accordi strategici degli aeroporti italiani

Per arginare il rischio di perdita di traffico (*hub shifting*) e facilitare l'accesso ai biocarburanti, le società di gestione aeroportuale stanno assumendo un ruolo proattivo nell'ecosistema dell'aviazione. Analizzando il panorama italiano, le strategie adottate oggi dai gestori per incentivare l'uso del SAF e mitigarne i costi si sviluppano su due modelli di business distinti:

1) ***Il modello dell'incentivazione economica diretta:*** ad oggi, l'unico gestore in Italia ad aver implementato un sistema di sussidi economici diretti è il Gruppo SEA (Milano Linate e Malpensa). Attraverso un programma di supporto (*Support Program*) avviato nel 2023, l'azienda ha riconosciuto contributi finanziari alle compagnie aeree per compensare il differenziale di prezzo (*Green Premium*) tra il SAF e il cherosene fossile [57], arrivando a innalzare nel 2024 l'incentivo da 500 a 800 euro per ogni tonnellata di SAF erogata al fine di stimolare ulteriormente l'adesione iniziale [58].

Tuttavia, questo approccio ha registrato un mancato effetto emulazione nel panorama nazionale. Il motivo per cui gli altri gestori non hanno replicato il bando di SEA è duplice.

In primo luogo, strutturare un simile piano di sussidi richiede una solidità finanziaria e volumi di traffico tali da giustificare il ritorno sull'investimento. Malpensa è infatti uno dei due soli scali in Italia (insieme a Fiumicino) a superare la soglia delle 100.000 tonnellate annue di traffico merci previste dall'Europa, rappresentando da soli il 79% dei volumi cargo nazionali [10].

In secondo luogo, l'assenza di emulazione è strettamente legata all'evoluzione normativa. In seguito all'introduzione del Regolamento *ReFuelEU Aviation*, che impone per legge una quota minima e vincolante di SAF nei rifornimenti europei, gli altri gestori hanno ritenuto superfluo investire ingenti fondi propri per incentivare l'acquisto di un prodotto che, di fatto, si è trasformato in un obbligo normativo. A sostegno di quanto detto, proprio in concomitanza con l'entrata in vigore dei mandati obbligatori europei, lo stesso Gruppo SEA ha ritenuto esaurito lo scopo propulsivo della misura e ha interrotto l'erogazione del proprio programma di supporto finanziario [57].

2) ***Il modello degli accordi infrastrutturali e commerciali di filiera:*** escludendo l'eccezione milanese, l'incentivazione all'uso del SAF in Italia si è sviluppata primariamente attraverso accordi strategici volti ad abbattere le barriere logistiche. Secondo questo modello, l'aeroporto si allea con i fornitori energetici per portare fisicamente il carburante nello scalo, facilitando in questo modo anche i contratti di fornitura a lungo termine tra compagnie aeree e produttori.

La validità di questo approccio strutturale trova concreta applicazione nella strategia di Aeroporti di Roma (ADR). Il gestore ha infatti preferito non ricorrere alla leva del sussidio economico diretto, puntando piuttosto su intese commerciali di alto profilo per accelerare la transizione ecologica. Nel settembre del 2021, la società ha firmato una partnership strategica di decarbonizzazione insieme ad Eni con l'obiettivo di introdurre combustibili sostenibili per l'aviazione (SAF) e per la movimentazione a terra (HVO), confermando la volontà di fare di Fiumicino e Ciampino tra gli scali più sostenibili a livello globale [59]. In questo contesto, lo scalo romano si è fatto inoltre promotore di iniziative congiunte che uniscono gestore aeroportuale, produttore energetico e compagnia aerea come per la collaborazione diretta tra ITA Airways, Eni e Aeroporti di Roma, che nel 2022 ha portato all'inaugurazione delle prime due tratte (Roma-Venezia e Roma-Barcellona) completamente servite da SAF [10].

A conclusione dell'analisi sul ruolo delle infrastrutture aeroportuali, la seguente tabella (Tabella 5) propone una sintesi schematica delle vulnerabilità operative e commerciali affrontate dai gestori, affiancate dalle relative strategie di mitigazione attualmente adottate o in fase di sviluppo nel panorama nazionale italiano.

Rischio affrontato	**Strumento di mitigazione**	**Livello di maturità**	**Dettaglio operativo**
Rischio di competitività e h*ub shifting*	Sussidi economici diretti	Concluso	Con l'entrata in vigore dei mandati obbligatori del Regolamento *ReFuelEU Aviation*, il programma di sussidio locale ha esaurito il suo scopo propulsivo ed è stato ufficialmente interrotto

Rischio frodi e qualità del carburante	Standardizzazione dei carburanti drop-in	Pienamente operativo e vincolante	l SAF viene rigorosamente certificato secondo lo standard ASTM D7566 prima di entrare in scalo
Rischio di accesso alle infrastrutture	Accordi strategici di filiera	In sviluppo	I gestori superano le rigidità logistiche siglando accordi diretti come la partnership tra Aeroporti di Roma (ADR), Eni e ITA Airways
Rischio logistico legato al b*lending*	Traslazione del *blending Upstream*	Pienamente operativo	Il *blending* viene traslato a monte (nelle bioraffinerie o nei terminal dedicati) e i gestori assolvono al loro obbligo di facilitatori sfruttando la vicinanza geografica con gli impianti nazionali, mitigando i costi di trasporto

Tabella 5- Tabella riassuntiva rischio-mitigazione.

3.3 Domanda: compagnie aeree

Il lato della domanda è rappresentato dalle compagnie aeree che in qualità di acquirenti finali e utilizzatori fisici del carburante, sono i soggetti su cui ricadono i maggiori oneri finanziari e operativi derivanti dalla transizione ecologica.

L'Articolo 3 del Regolamento (UE) 2023/2405 (*ReFuelEU Aviation*), ripreso dai manuali IATA e dai report EASA, definisce "Operatore Aereo", assoggettato agli obblighi della stessa, come *"un soggetto che ha operato almeno 500 voli di trasporto aereo commerciale di passeggeri o 52 voli di trasporto aereo commerciale «all-cargo» in partenza da aeroporti dell'Unione nel periodo di riferimento precedente oppure, se tale soggetto non può essere identificato, il proprietario dell'aeromobile"* [16]. Sono pertanto esclusi dal mandato i voli di natura eccezionale (militari, umanitari, medici, di ricerca e soccorso) e i piccoli operatori che non raggiungono le soglie minime di traffico commerciale [16].

	Description
Definition	As per **Article 3.3**, *'aircraft operator' means a person who operated at least 500 commercial passenger air transport flights, or 52 commercial all-cargo air transport flights departing from Union airports in the previous reporting period or, where it is not possible for that person to be identified, the owner of the aircraft.*
Scope list	List of aircraft operators in-scope of the Regulation.
Obligations	**Article 5** sets out the refuelling obligations and mandates aircraft operators to uplift at least 90% of the aviation fuel[15] required at Union airports on a yearly basis. In the cases this threshold is not met, aircraft operators shall justify as per Article 5.2 to the NCA. Alternatively, the aircraft operators may also request refuelling exemptions on certain routes meeting the criteria set out in Article 5.3. **Article 14** establishes a voluntary environmental labelling scheme, the Flight Emissions Label (FEL), under which aircraft operators shall apply to the Agency should they want to display emissions per passenger or emissions per passenger-kilometre to the public.[16]
Reporting process	As per **Article 8**, the aircraft operators are required to submit by 31 March of each reporting year the completed official reporting template with the data of the respective reporting period to the NCAs and to the Agency via either EASA's Sustainability Portal or email. Pursuant to the FEL, aircraft operators are required to submit by 1 May of each year starting in 2025 the required information under Article 3 FEL to the Agency to estimate flight emissions.

Figura 3.15- Obblighi della ReFuelEU Aviation per gli operatori aerei.

Fonte: EASA (2025) [15].

Per quanto concerne l'applicazione pratica di tale definizione, l'Agenzia dell'Unione Europea per la Sicurezza Aerea (EASA) ha pubblicato nel suo *Annual Technical Report 2025* i dati ufficiali relativi al primo anno di rendicontazione (dati 2024) in cui vengono fornite le liste nominali ufficiali per il 2024 degli operatori aerei che sono assegnati all'Autorità Competente del rispettivo Stato di riferimento.

Per quanto riguarda l'Italia, l'elenco dei vettori soggetti alla giurisdizione nazionale (vedi Figura 3.16) include, tra questi, ITA Airways (Italia Trasporto Aereo S.p.A.), Air Dolomiti, Neos, Aeroitalia e Poste Air Cargo. È interessante notare come l'architettura del regolamento preveda che i grandi vettori *low-cost* esteri, pur avendo quote di mercato dominanti negli scali italiani, rispondano agli obblighi di

rendicontazione presso le Autorità Competenti dei loro Paesi di registrazione: ne sono un esempio Ryanair (assegnata all'Irlanda), Wizz Air (Malta e Ungheria) ed easyJet (Austria per la divisione Europe) [15].

ITALY		
CRCO Identification number	*Operator Name*	*State of the Operator*
49312	AEROITALIA SRL	ITALY
46358	AIR ALBANIA	ALBANIA
11479	AIR DOLOMITI	ITALY
334	ALBA SERVIZI AEROTRANSPORTI S.P.A.	ITALY
46282	ALISERIO S.R.L.	ITALY
24261	AVIONORD	ITALY
590	BRITISH AIRWAYS PLC	UNITED KINGDOM
35318	CARGOLUX ITALIA	ITALY
23756	DHL AVIATION EEMEA	BAHRAIN
1039	ETHIOPIAN AIRLINES	ETHIOPIA
43521	FLY ONE S.R.L.	MOLDOVA
32796	ITALFLY 2	ITALY
48643	ITALIA TRASPORTO AEREO S.P.A.	ITALY
37126	LEADER S.R.L.	ITALY
32051	MERIDIAN AIRCOMPANY	UKRAINE
28484	NEOS	ITALY
8487	POSTE AIR CARGO S.R.L.	ITALY
23730	PRINCE AVIATION	SERBIA
45973	SAN MARINO EXECUTIVE AVIATION S.R.L.	SAN MARINO
37839	SARDINIAN SKY SERVIC	ITALY
8484	SIRIO	ITALY
49201	SKYALPS	ITALY
28058	SLAM LAVORI AEREI S.R.L.	ITALY

Figura 3.16- Lista degli operatori aerei italiani nell'ambito di applicazione della ReFuelEU Aviation per il periodo di rendicontazione del 2024.

Fonte: EASA (2025).

I rischi per le compagnie aeree e le relative strategie di mitigazione

L'implementazione dei mandati vincolanti espone le compagnie aeree a quattro categorie principali di rischio, a cui il legislatore e il mercato stanno rispondendo con specifici strumenti di allocazione e mitigazione che vengono presentati in questo capitolo e successivamente approfonditi:

- ***Rischio legato al "green premium" e all'aumento dei costi operativi:***

  attualmente il SAF ha costi di produzione significativamente più elevati rispetto al cherosene fossile, con un divario di prezzo che minaccia di erodere i margini di profitto delle compagnie o di tradursi in un forte rincaro dei biglietti per i passeggeri [10].

  → **La strategia di mitigazione: EU ETS e Contratti per Differenza**

  Per compensare questo divario, la revisione del sistema di scambio di quote di emissione (EU ETS) ha istituito un fondo specifico [10]. Per il periodo 2024-2030, sono riservate 20 milioni di quote gratuite destinate esclusivamente a coprire in tutto o in parte il differenziale di prezzo per gli operatori aerei che utilizzano SAF [31]. Inoltre, a livello contrattuale, si sta promuovendo l'uso dei Contratti per Differenza (CfD), che fissano un

prezzo garantito a lungo termine e proteggono le compagnie dalla volatilità del mercato [10].

- **Rischio sanzioni:**

  per evitare di fare rifornimento negli scali europei dove i mandati SAF rendono il carburante più costoso, le compagnie aeree potrebbero essere incentivate a imbarcare carburante in eccesso negli scali extra-UE o in quelli più economici [10]. Questa pratica nota come "*fuel tankering"* aumenta il peso dell'aeromobile, generando un maggiore consumo di carburante ed emissioni aggiuntive, vanificando gli sforzi climatici [16].

  → **La strategia di mitigazione: Obbligo di *uplift* al 90% e sanzioni**

  Per stroncare il fenomeno, l'Articolo 5 del ReFuelEU introduce un obbligo rigoroso: la quantità annua di carburante caricata da una compagnia aerea in un aeroporto dell'Unione deve corrispondere ad almeno il 90% del carburante necessario per i voli in partenza da quello scalo [16]. Qualora la compagnia non rispetti tale soglia, viene colpita da una sanzione pecuniaria severa [16].

- **Rischi logistici ed infrastrutturali:**

  le compagnie aeree rischiano di non poter accedere fisicamente al SAF in tutti gli scali europei a causa di carenze infrastrutturali locali, vedendosi impossibilitate a soddisfare i propri target aziendali di sostenibilità [10].

  → **La strategia di mitigazione: Sistemi Book and Claim**

  Le compagnie possono finanziare l'acquisto di SAF immesso in un qualsiasi aeroporto dell'Unione e riceverne i relativi "certificati" ambientali, rendicontando la riduzione delle emissioni senza dover trasportare fisicamente il carburante nei propri aerei in altri scali sprovvisti di infrastruttura [23]. Una soluzione alternativa prevede di stringere accordi con altri stakeholder [16] come nel caso di ITA Airways con ADR ed Eni a Fiumicino.

- **Rischio legato al danno reputazionale e calo della domanda da parte dei passeggeri:**

  se i maggiori costi operativi vengono trasferiti sul prezzo del biglietto senza un'adeguata comunicazione del beneficio ambientale, i consumatori tenderanno a scegliere compagnie extra-UE meno virtuose ma più economiche, causando un calo della domanda per i vettori europei [10].

  → **La strategia di mitigazione: EU Flight Emissions Label (FEL)**

  Per trasformare la sostenibilità in un vantaggio competitivo, EASA ha introdotto l'etichetta ambientale per i voli (FEL) [61]. Questo sistema certifica in modo standardizzato le prestazioni ambientali del volo e il quantitativo di SAF utilizzato [61] . In questo modo, i passeggeri ottengono informazioni trasparenti e confrontabili, potendo compiere scelte informate e premiare le compagnie aeree che investono realmente nella decarbonizzazione [16] .

Sebbene gli strumenti descritti finora siano tutti contemplati dal quadro normativo o dalle dinamiche di mercato, un'analisi dello stato dell'arte al 2026 rivela come essi si trovino in stadi di maturazione

profondamente diversi. Nella seguente tabella (Tabella 6) si propone una mappatura delle principali strategie a disposizione degli operatori aerei, classificate in base al loro effettivo stato di implementazione: si passa dalle misure già vincolanti agli strumenti rallentati da iter burocratici.

Rischio affrontato	Strumento di mitigazione	Livello di maturità	Dettaglio operativo
Rischio di *"fuel tankering"*	Regolamento ReFuelEU Aviation	Pienamente operativo e vincolante	Gli obblighi di miscelazione e il vincolo di rifornimento minimo del 90% sono pienamente attivi e sanzionabili [16]
Rischio legato al "green premium"	Sistema EU ETS (Fondo quote SAF)	Pienamente Operativo e vincolante	È attiva l'erogazione del fondo da 20 milioni di quote gratuite per compensare il g*reen premium* dei SAF. Parallelamente, è in corso il taglio lineare delle quote gratuite tradizionali (azzeramento previsto per il 2026) [24]
Rischio legato al "green premium"	Contratti per Differenza (CpD / CfD)	In via di definizione normativa	Strumento contrattuale a lungo termine che fissa un prezzo garantito (*strike price*) compensando gli scostamenti rispetto al mercato [10]. Questo meccanismo protegge le compagnie aeree da oneri eccessivi scaricati sui passeggeri in periodi di rialzo dei costi [10]
Rischi logistici ed infrastrutturali	Sistemi *Book and Claim*	In via di definizione normativa	Modello che consente di disaccoppiare i benefici ambientali dal prodotto fisico, trasferendoli tramite registri dedicati indipendentemente dai limiti infrastrutturali dello scalo
Rischio legato al danno reputazionale	Etichetta *Flight Emissions Label* (FEL)	In via di definizione normativa	Il sistema è attualmente testato in via esclusiva dall'Agenzia EASA su un campione ristretto di vettori volontari (es. Air France-KLM) per rodarne l'infrastruttura digitale [15]

Tabella 6- Stato dell'arte e maturità delle strategie di mitigazione per gli Operatori Aerei (aggiornamento 2026).

Come emerge in modo evidente dalla mappatura proposta, gli strumenti attualmente a disposizione delle compagnie aeree presentano una dicotomia: da un lato vi sono obblighi e costi stringenti già pienamente

in vigore, dall'altro gli strumenti di flessibilità più utili al mercato risultano rallentati da lunghi iter burocratici o tecnici. I tempi della legislazione tradizionale si dimostrano spesso troppo rigidi rispetto alla rapidità di evoluzione richiesta dal mercato dei SAF.

Per superare questo collo di bottiglia, sia le istituzioni europee che quelle nazionali stanno promuovendo l'adozione degli strumenti come le *regulatory sandboxes* che sono argomento centrale di questa tesi. Dato l'enorme potenziale di questo approccio nel superare le attuali barriere tecniche ed economiche senza generare rischi sistemici, la costruzione pratica degli spazi di sperimentazione normativa costituirà l'oggetto di analisi esclusivo del prossimo capitolo.

3.4 Istituzioni e autorità di regolazione

A completamento dell'analisi della filiera, è necessario delineare la ripartizione dei poteri esecutivi, sanzionatori e di monitoraggio attribuiti dal Regolamento *ReFuelEU Aviation* e dalle normative nazionali alle autorità competenti.

A livello europeo: Commissione europea ed EASA

la Commissione Europea e l'EASA, insieme alle autorità designate degli stati membri, operano in maniera coordinata per assicurare l'omogeneità dell'applicazione delle regole sull'intero territorio dell'Unione [16].

- **Commissione Europea:**

  la Commissione detiene il potere di monitorare l'impatto macroeconomico del mandato SAF [16]. Ha il potere di veto e abrogazione sulle esenzioni concesse dagli stati membri agli operatori aerei in merito agli obblighi di rifornimento (Articolo 5) [16]. Inoltre, è l'organo a cui la legge conferisce il mandato esclusivo per valutare l'istituzione e l'integrazione di meccanismi strutturali futuri, come il sistema di negoziabilità *Book and Claim* (Articolo 15) [1][16], e per presentare proposte legislative di revisione del regolamento stesso [16].

- **EASA (Agenzia dell'Unione Europea per la Sicurezza Aerea):**

  L'agenzia è l'unico ente designato per la raccolta, la verifica e la pubblicazione dell'*Annual Technical Report* (Articolo 13), strumento con cui aggrega i dati di fornitori, compagnie e aeroporti per valutare lo stato di conformità del mercato [16]. L'EASA detiene, inoltre, il potere istitutivo e la gestione diretta del sistema di etichettatura ambientale dei voli (*Flight Emissions Label* o FEL), definendone gli standard tecnici di misurazione per la tutela dei consumatori (Articolo 14) [16].

[1] "*Entro il 1° luglio 2024 la Commissione individua e valuta le evoluzioni in materia di produzione e fornitura di carburanti sostenibili per l'aviazione sul mercato del carburante per l'aviazione dell'Unione e valuta eventuali miglioramenti o misure supplementari rispetto all'attuale meccanismo di flessibilità dei carburanti sostenibili per l'aviazione di cui al paragrafo 1, quali l'istituzione o il riconoscimento di un sistema di negoziabilità dei carburanti sostenibili per l'aviazione per consentire l'approvvigionamento di carburante nell'Unione senza bisogno di una connessione fisica a un sito di fornitura, al fine di agevolare ulteriormente la fornitura e la diffusione di carburanti sostenibili per l'aviazione durante il periodo di flessibilità".*

A livello nazionale: autorità competenti

Il legislatore europeo demanda a ciascuno stato membro il compito di designare le proprie "autorità competenti" per l'applicazione diretta della legge [2] [16]. Nel panorama italiano, questo ruolo istituzionale vede il coinvolgimento diretto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (MIT) e dell'Ente Nazionale per l'Aviazione Civile (ENAC) [64].

In particolare, secondo l'Articolo 5 del regolamento, le autorità nazionali hanno il potere di valutare e concedere deroghe logistiche agli operatori aerei [16], ma soprattutto detengono l'obbligo di infliggere le severe sanzioni pecuniarie previste per chi viola le quote minime di SAF [3] o le clausole *anti-tankering*, vincolandone i proventi al finanziamento della ricerca nel settore [4] [16].

Accanto alle funzioni sanzionatorie, queste istituzioni svolgono ruoli operativi e strategici fondamentali:

- Il MIT detiene il potere di indirizzo politico, ad esempio, coordinando i tavoli tecnici istituzionali per definire la *roadmap* nazionale di decarbonizzazione [10].
- L'ENAC agisce con potere di approvazione e collaudo tecnico-amministrativo sui *masterplan* aeroportuali e sui progetti di adeguamento infrastrutturale vigilando affinché lo sviluppo degli scali rispetti i vincoli normativi, ambientali e di qualità del servizio [62].

La complessità della transizione ecologica richiede tuttavia la cooperazione di ulteriori soggetti che operano a livello nazionale nel settore del trasporto aereo come l'Autorità di Regolazione dei Trasporti (ART). Pur non essendo direttamente coinvolta nell'applicazione e nel controllo degli obblighi imposti dal *ReFuelEU Aviation*, l'ART configura come un esempio di partner istituzionale strategico per lo sviluppo di future sperimentazioni sotto forma di *regulatory sandboxes.* Questa autorità indipendente [63], infatti, ha la facoltà di abilitare leve economiche temporanee, offrendo ai vettori un incentivo a favorire l'imbarco dei SAF e al contempo supporta in via indiretta lo Stato nel raggiungimento dei target nazionali di miscelazione fisica.

Nello specifico, l'ART disciplina il sistema dei diritti aeroportuali attraverso la definizione di modelli tariffari [63] e vigila ex-post affinché l'applicazione delle tariffe risponda a principi di trasparenza e non-discriminazione [63], avvalendosi di poteri sanzionatori per prevenire eventuali condotte che potrebbero danneggiare gli utenti [63].

Al fine di fornire un quadro sistematico delle diverse funzioni istituzionali si propone di seguito una tabella riassuntiva (Tabella 7) che illustra il ruolo assunto dai decisori pubblici per governare la

[2] "*Gli Stati membri designano l'autorità o le autorità competenti responsabili dell'applicazione del presente regolamento e dell'imposizione di sanzioni pecuniarie agli operatori aerei, agli enti di gestione degli aeroporti dell'Unione e ai fornitori di carburante per l'aviazione. Gli Stati membri informano la Commissione e l'Agenzia dell'identità dell'autorità o delle autorità competenti da essi designate".*

[3] *"Gli Stati membri provvedono affinché agli operatori aerei che non rispettano gli obblighi di cui all'articolo 5 sia imposta una sanzione pecuniaria".*

[4] *"Gli Stati membri dovrebbero cercare di garantire che le entrate generate dalle sanzioni pecuniarie, o l'equivalente in valore finanziario di tali entrate, siano utilizzate per sostenere progetti di ricerca e innovazione nel settore dei carburanti sostenibili per l'aviazione, la produzione di tali carburanti ovvero meccanismi che consentano di colmare le differenze di prezzo tra i carburanti sostenibili per l'aviazione e i carburanti convenzionali per l'aviazione".*

transizione ecologica del settore, partendo dalle istituzioni europee (Commissione europea ed EASA) per giungere alle autorità come MIT, l'ENAC e l'ART nel contesto regolatorio italiano.

Livello di Giurisdizione	Autorità / Istituzione	Categoria di Potere
Comunitario	Commissione europea	Legislativo, di revisione e veto
Comunitario	EASA	Monitoraggio, certificazione e tutela
Nazionale	Autorità competenti (designate dai singoli Stati)	Esecutivo e sanzionatorio
Nazionale, Italia	MIT ed ENAC	Politico, coordinamento e collaudo
Nazionale, Italia	ART	Vigilanza, regolazione tariffaria e sanzionatorio

Tabella 7- Mappatura delle autorità di regolazione e dei relativi poteri statutari (quadro ReFuelEU e nazionale).

4 Politiche di mitigazione e incentivi di mercato

Gli obblighi di miscelazione, se considerati isolatamente, non bastano a guidare la transizione del settore. Per superare questa criticità, il quadro del *ReFuelEU Aviation* individua la necessità di affiancare ai mandati normativi incentivi economici mirati a ridurre il *price gap* ed evitare distorsioni della concorrenza [16]. Gli obiettivi strategici di tali interventi sono infatti quelli di ripartire il rischio finanziario lungo la filiera, stimolare la domanda e l'offerta nonché di assicurare un supporto economico sia agli operatori industriali sia ai vettori aerei. Alcune delle soluzioni che verranno affrontate nel capitolo che segue sono suggerite come possibili *pathways* in Figura 4.1.

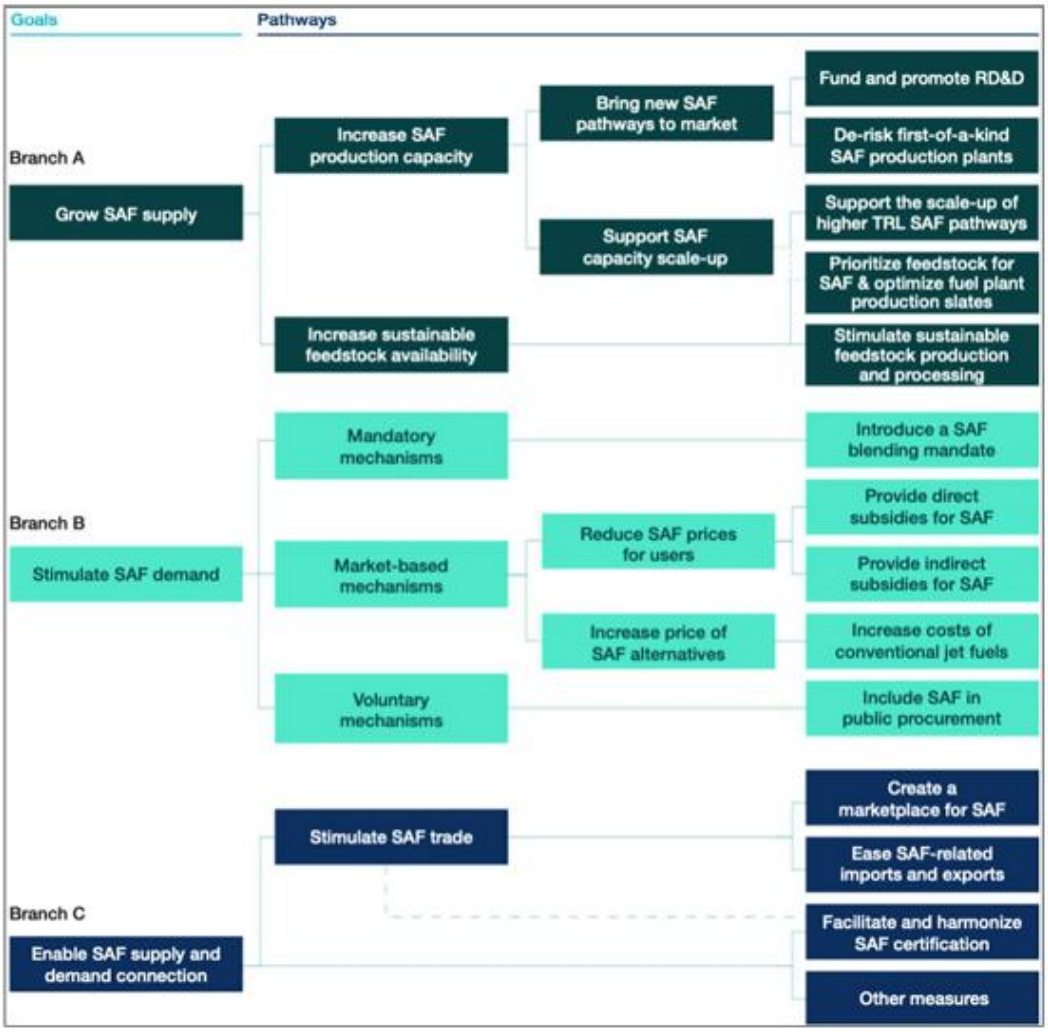


Figura 4.1- Classificazione delle SAF policy secondo il World Economic Forum toolkit.

Fonte: ENAC (2024) [64].

4.1 I Contratti per Differenza (CfD) e i Carbon Contracts for Difference (CCfD)

I Contratti per Differenza (CfD) e i Carbon Contracts for Difference (CCfD) sono contratti stipulati tra un'autorità garante e un soggetto beneficiario [65], pensati per mitigare la volatilità dei prezzi e favorire l'ingresso sul mercato di tecnologie non ancora competitive. Pur condividendo l'obiettivo di stabilizzare i flussi di cassa dei produttori di SAF coprendo il divario tra un valore target e un indice di mercato, i due meccanismi differiscono per l'oggetto della garanzia e per le metriche utilizzate nel calcolo del conguaglio.

Contratti per differenza (*Contracts for Difference* o CfD)

In linea con le indicazioni del report del Politecnico di Torino per il Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (MIT), questo strumento opera compensando le oscillazioni del valore di mercato dei SAF (*reference value*) rispetto a un prezzo di esercizio (*strike price*) prefissato, determinato attraverso accordi bilaterali tra ente pubblico e sviluppatori oppure mediante aste pubbliche per la selezione di diversi progetti [10]. Come evidenziato dallo studio del Parlamento europeo di gennaio 2026 (*Overview of the diffusion of Power Purchase Agreements and Contracts for Difference across Member States*), l'adozione di questi contratti persegue due finalità chiave: da un lato, riduce o copre interamente lo scarto tra i costi di produzione degli impianti e i loro ricavi commerciali, dall'altro, solleva in parte i produttori dal rischio sulle oscillazioni dei prezzi di mercato, trasferendolo sul settore pubblico [66].

Il meccanismo di risarcimento sulla quale si basa questo strumento economico, illustrato in Figura 4.2, si caratterizza per una compensazione monetaria perfettamente simmetrica chiamata "*two-way CfD"*[66]. Se le condizioni di mercato spingono il prezzo a cui il produttore vende il SAF (prezzo di riferimento) al di sotto dello *strike price* concordato, lo Stato (o l'autorità pubblica designata) interviene erogando al produttore di SAF un sussidio integrativo pari alla differenza tra i due valori [17]. Se il prezzo di riferimento invece supera la soglia dello *strike price* (ad esempio in occasioni di scenari di forte aumento del costo dei carburanti fossili o di scarsità estrema di SAF) il produttore è contrattualmente obbligato a restituire l'eccedenza finanziaria allo Stato [66].

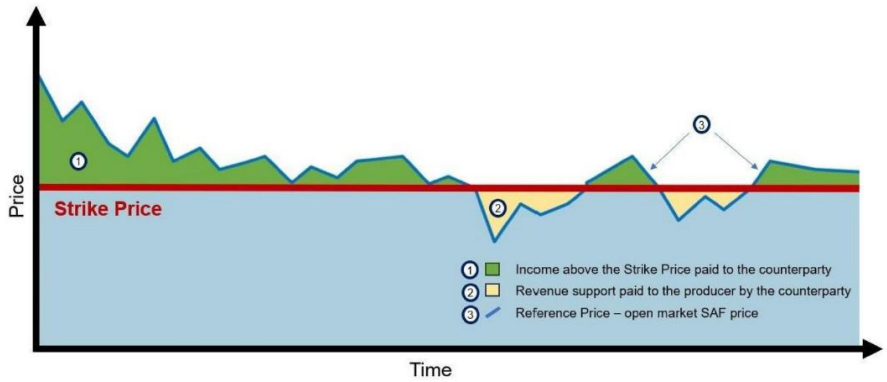


Figura 4.2- Schema raffigurante il meccanismo di compensazione dei contratti per differenza.

Fonte: Cerulogy [17].

L'implementazione di questa struttura contrattuale nel settore dei SAF offrirebbe un duplice beneficio. Analizzando il lato dell'offerta, la certezza di un ricavo minimo fisso (*strike price*) per ogni tonnellata di

SAF erogata, garantito dallo stato, ridurrebbe il rischio di mercato associato alla vendita del carburante alternativo [10] e aumentando nel contempo la bancabilità dei progetti ad alta intensità di capitale e rischio tecnologico, specialmente per gli impianti industriali pioniere di tipo "first-of-a-kind" (FOAK) (vedi Figura 4.3). Riducendo la percezione del rischio da parte degli istituti di credito [10], lo strumento favorirebbe inoltre investimenti che altrimenti sarebbero frenati dall'incertezza regolatoria. Lato domanda invece, lo studio del Politecnico di Torino propone la creazione di "*pool*" di produttori garantiti dal governo che attirerebbero vettori aerei interessati a partecipare ad aste d'acquisto, beneficiando in questo modo di forniture di SAF certificate e a prezzi stabili nel lungo termine [10].



Figura 4.3- Dashboard sintetica degli impatti dei Contratti per differenza sul mercato dei SAF.

Fonte: WEF (2021) [23].

Carbon contracts for difference (CCfD)

In base alle linee guida ufficiali della Commissione Europea (CEEAG), un CCfD si definisce formalmente come "*un accordo di sovvenzione a lungo termine tra un'autorità pubblica erogatrice e un beneficiario privato, strutturato per coprire i costi netti di abbattimento di progetti di decarbonizzazione industriale attraverso la stabilizzazione del valore monetario dei crediti di carbonio associati al progetto"*[65]. I CCfD, dunque, costituiscono una specifica variante dei CfD, applicando la medesima struttura contrattuale al mercato delle emissioni di CO_2.

In modo analogo alla prima tipologia di contratto, l'assegnazione dei CCfD avviene tramite aste competitive [65] in cui i partecipanti presentano un proprio progetto industriale di decarbonizzazione, dichiarando il volume di emissione che quell'iniziativa sarebbe in grado di abbattere grazie all'implementazione di nuove tecnologie low-carbon rispetto a uno scenario di riferimento tradizionale (*Business-as-Usual* o BAU) [67].
Nell'ambito della gara d'appalto, l'ente pubblico fissa un budget massimo limitato e i diversi sviluppatori industriali che vogliono realizzare i propri progetti presentano la propria offerta economica (*bid*) [65]. L'autorità ordina quindi le proposte in base al sussidio unitario richiesto [65] e, assegnando a ciascuno uno *score* sulla base di requisiti predefiniti, aggiudica i contratti a partire dai *bid* più bassi fino a capienza delle risorse disponibili. Come documentato nel rapporto *Carbon contracts for difference schemes for industrial decarbonisation under the CEEAG*, per i progetti vincitori, il valore del *bid* costituisce lo *strike price* vincolante del CCfD, rappresentando la soglia minima di ricavo necessaria a coprire i costi industriali e garantire la sostenibilità finanziaria dell'iniziativa [65].

Avviata la fase operativa dell'impianto, lo *Strike Price* fisso viene confrontato quotidianamente con l'indice di mercato del carbonio. Nelle direttive CEEAG, tale parametro coincide generalmente con la quotazione ufficiale dei permessi dell'EU ETS (Emissions Trading System), pur essendo ammessi indici alternativi. [65]. La scelta dell'EU ETS deriva dal suo ruolo di prezzo di riferimento per le emissioni

industriali: un aumento del prezzo delle quote ETS incrementa gli oneri per i soggetti inquinanti, rendendo le tecnologie *low-carbon* più competitive e riducendo il fabbisogno di supporto pubblico [67], mentre un calo dei prezzi ETS riduce il costo dell'inquinamento, aumentando così il rischio finanziario degli investimenti in decarbonizzazione.

Analogamente ai CfD tradizionali, il conguaglio economico dei CCfD viene regolato liquidando periodicamente il differenziale tra lo *strike price* del progetto (fissato in sede d'asta) e il prezzo di mercato delle quote EU ETS. Come illustrato nella Figura 4.4, il meccanismo di compensazione opera in modo speculare: se il valore dell'ETS scende al di sotto dello *strike price*, lo Stato riconosce all'operatore un sussidio pari alla differenza e se invece la quotazione ETS supera la soglia concordata, l'operatore dovrà restituire la differenza economica allo Stato.

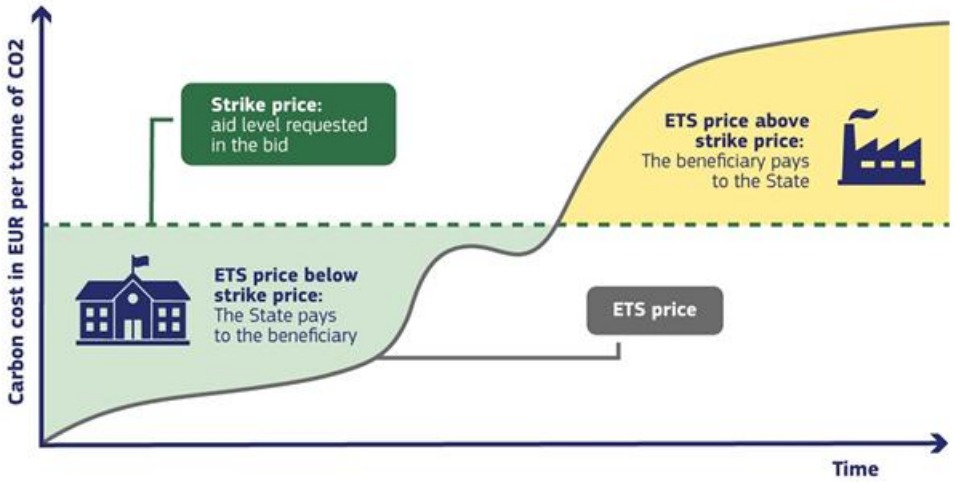


Figura 4.4- two-way CCfD.

Fonte: Carbon contracts for difference schemes for industrial decarbonisation under the CEEAG: State aid guidance for Member States. European Union [65].

L'applicazione pratica di questo strumento alla filiera aeronautica incontra tuttavia un ostacolo strutturale identificato all'interno dello studio del Politecnico di Torino. Il documento evidenzia infatti le criticità legate alla concorrenza tra diverse tecnologie per la riduzione delle emissioni atmosferiche in un contesto intersettoriale [10]. Poiché la produzione di SAF presenta costi di abbattimento delle emissioni per singola tonnellata estremamente elevati rispetto ad altre iniziative di decarbonizzazione, un'asta di CCfD concepita in modo neutro e aperta a tutte le tecnologie vedrebbe i progetti dei carburanti aeronautici sostenibili sistematicamente scartati dai *bid* più bassi di altri comparti. Per questa ragione, lo studio del Politecnico di Torino rimarca l'importanza di istituire aste di CCfD specificamente dedicate alla filiera dei SAF e modellate sulle strutture di costo di questo settore [10].

Per confrontare la struttura operativa dei due strumenti di supporto, è utile riassumerne le analogie funzionali e le divergenze. Sebbene sia i CfD sia i CCfD condividano l'obiettivo macroeconomico di mitigare il rischio legato ai prezzi per migliorare la bancabilità dei progetti, le due misure si fondano su mercati di riferimento distinti. Mentre il CfD tradizionale interviene direttamente sul prezzo del combustibile fisico per colmare il *price gap* con la controparte fossile, il CCfD lega il supporto pubblico alle fluttuazioni dell'EU ETS o di altri parametri alternativi, condizionando la remunerazione alle performance di abbattimento ambientale.

In Tabella 8 e Tabella 9 vengono messi a confronto i due strumenti economici, evidenziandone i punti di contatto e i limiti specifici per il settore dei SAF.

Dimensione di analisi	Contratti per differenza tradizionali (CfD)	Carbon contracts for difference (CCfD)
Obiettivo	Ridurre l'incertezza legata alla fluttuazione futura dei prezzi sul mercato e garantire la competitività economica delle soluzioni ecologiche	
Struttura finanziaria di base	Compensazione monetaria degli scostamenti tra un prezzo fisso concordato (*strike price*) e un prezzo fluttuante di mercato (*reference price*)	
Meccanismo di compensazione simmetrico	Se il prezzo di riferimento sul mercato è inferiore allo *strike price*, lo Stato paga la differenza al produttore. Se lo supera, il produttore restituisce l'eccedenza (*two-way*).	
Modalità di assegnazione	Possono essere stabiliti tramite negoziati bilaterali o determinati mediante aste competitive tra progetti per abbassare i costi	

Tabella 8- Similitudini tra CfD e CCfD.

	Contratti per Differenza Tradizionali (CfD)	Carbon Contracts for Difference (CCfD)
Oggetto della stabilizzazione	Prezzo di vendita commerciale del **bene fisico** prodotto ed erogato (es. tonnellate di carburante SAF).	Valore economico delle **emissioni evitate** associato al progetto di decarbonizzazione.
Metrica dello s*trike price*	Espresso in valuta per unità fisica di energia o combustibile erogato (**€/t di SAF**)	Espresso in valuta per tonnellata di emissioni di carbonio evitate rispetto a uno scenario tradizionale (**€/tCO_2e evitata**)
Parametro del r*eference price*	Prezzo effettivo che il produttore riceve vendendo il prodotto fisico in un mercato libero	Prezzo reale della CO_2 sul mercato regolamentato, tipicamente rappresentato dalle quote del sistema **EU ETS**
Incentivo alla decarbonizzazione	**Indiretto:** garantisce la stabilità dei ricavi per la vendita di SAF a prescindere dall'effettivo quantitativo di emissioni evitate in esercizio	**Diretto:** stabilisce un prezzo fisso per i crediti derivanti dalla riduzione delle emissioni, remunerando l'efficienza ecologica reale
Limiti e rischi applicativi	L'applicazione può risultare complessa per le tecnologie pioniere (*first-of-a-kind*) caratterizzate da un elevato rischio tecnologico iniziale	Rischio di esclusione dei progetti SAF se le aste non sono dedicate (intra-settoriali), a causa dei costi di abbattimento delle emissioni tramite SAF molto più elevati rispetto ad altri progetti che prevedono la riduzione di CO_2.

Tabella 9- Differenze strutturali tra CfD e CCfD applicati ai SAF .

4.1.1 Allocazione del rischio lungo la filiera dei SAF

L'introduzione dei Contratti per Differenza (CfD) nel settore dell'aviazione civile rappresenta una complessa operazione regolatoria e finanziaria. Infatti, disegnare e implementare un sistema di CfD nella realtà richiede di anticipare e modellare le risposte strategiche, le esternalità e le conseguenze sistemiche che l'applicazione di questo strumento produce su ciascun attore della catena del valore.

Di seguito viene esposta un'analisi approfondita dei rischi reali che insistono su ciascun nodo della filiera dei SAF nel caso di adozione dello strumento fin ora presentato per favorire l'adozione dei carburanti alternativi sul territorio nazionale. Partendo dai produttori di SAF, beneficiari primari dei flussi compensativi previsti dai CfD, questi soggetti rimangono esposti a gravi rischi industriali ed operativi che il contratto non è in grado di neutralizzare del tutto come confermato dallo studio "*Overview of the diffusion of Power Purchase Agreements and Contracts for Difference across Member States*" realizzato nel gennaio 2026 dal Parlamento europeo.

I rischi che gravano sui produttori di SAF possono essere classificati in:

Rischi di sottoperformance degli impianti FOAK: i CfD rientrano nella categoria degli strumenti di supporto basati sulla produzione ("*production-based"*) [66] dunque la remunerazione, che spetta ai beneficiari del contratto, è strettamente proporzionale al quantitativo di carburante effettivamente prodotto ed erogato [10], l'operatore si assume interamente il rischio legato ai volumi forniti. Gli impianti di tipo *First-of-a-Kind* (FOAK) potrebbero infatti non essere in grado di garantire le prestazioni promesse [36] compromettendo così la generazione di ricavi e impedendo l'ammortamento dell'investimento fisso. Dunque, la mancata produzione in presenza di costi fissi molto elevati (di cui è stata fornito un panorama nei capitoli precedenti) condurrebbe rapidamente alla crisi di liquidità del progetto.

- **Rischi legati alla volatilità del prezzo dei *feedstock*:** per la tecnologica HEFA, unica attualmente commercializzabile, il costo di investimento in capitale costituisce solo il 22-40% del costo totale, mentre il costo del *feedstock* rappresenta la quota maggioritaria del 51-69%. Di conseguenza, l'HEFA ha un potenziale intrinsecamente limitato di riduzione dei costi a lungo termine a causa di questa dipendenza. Se lo *strike price* del CfD è fisso per la durata totale del contratto, che in genere oscilla tra i 15 e 20 anni [66], un'impennata del prezzo internazionale dei *feedstock* biologici eroderebbe interamente i margini del produttore. Questa criticità è aggravata da un forte disallineamento tra domanda e offerta in Europa. Dal momento che l'UE consuma attualmente un volume di UCO (feedstock principale per la produzione di SAF tramite la tecnologia HEFA) ampiamente superiore alla propria produzione endogena è costretta a colmare questo divario attraverso massicce importazioni dai paesi asiatici [15]. Dunque, qualsiasi alterazione delle catene logistiche globali generebbe un rischio di approvvigionamento e volatilità dei prezzi che può rendere l'impianto in perdita malgrado il CfD.

Una conseguenza diretta dell'incapacità produttiva prima discussa compromette a sua volta le compagnie aeree che affronterebbero un rischio di sostenibilità commerciale connesso alla reperibilità fisica del combustibile. Se il produttore con cui il vettore ha stipulato un CfD va incontro a inadempimento operativo o finanziario, la compagnia si ritrova priva del SAF necessario per assolvere agli obblighi di legge stabilite dal regolamento europeo *ReFuelEU Aviation*. Come ampiamente discusso nei capitoli precedenti dedicati, tale regolamento prevede infatti pesanti sanzioni finanziarie per il mancato rispetto

della quota fisica di miscelazione negli scali [16], lasciando il vettore esposto a rischi di conformità regolatoria per colpe esterne.

L'adozione di un CfD sposta interamente o in gran parte il rischio di fluttuazione del prezzo dal produttore privato al settore pubblico. L'autorità pubblica, assumendo il ruolo di controparte o garante finanziario, deve essere dunque in grado di prevedere e mitigare:

- **Rischi finanziari:** se il prezzo di mercato scende al di sotto dello *strike price*, lo Stato è legalmente obbligato a erogare pagamenti compensativi (*compensatory payments*) [66] per colmare il gap. Questi possono rappresentare un considerevole onere di bilancio, specialmente per quegli Stati membri che scelgono di finanziare lo strumento attingendo direttamente dal bilancio pubblico statale (comportando una crescita del deficit e limiti regolamentari di finanza pubblica) anziché tramite tasse addizionali specifiche [66].
- **Impossibilità di pianificazione finanziaria:** anche se lo stato adotta la formula bilaterale a due vie (*two-way CfD*) per recuperare le eccedenze quando il prezzo di mercato supera lo *strike price*, lo studio condotto dal Parlamento europeo evidenzia che questi flussi finanziari di ritorno sono intrinsecamente volatili e difficili da stimare [66]. Di conseguenza, l'autorità pubblica affronta una grave incertezza programmatoria, che rende più critica la formulazione di previsioni attendibili sull'impatto netto dello strumento [66] sui bilanci dello stato a medio-lungo termine.
- **Rischio di spiazzamento dei contratti commerciali privati:** un uso estensivo dei CfD pubblici rischia di spiazzare il mercato dei contratti a lungo termine tra privati (come i PPA aziendali o gli accordi bilaterali diretti tra compagnie aeree e fornitori). Questo fenomeno infatti ridurrebbe per gli sviluppatori privati gli incentivi a proporre contratti a prezzi competitivi a potenziali clienti, frenando la diversificazione dei canali di investimento privati e limitando lo sviluppo di dinamiche concorrenziali [66].
- **Rischio di comportamenti speculativi nelle aste:** durante le procedure competitive per l'assegnazione dello *strike price*, lo Stato è esposto alle strategie di offerta opportunistiche dei produttori (*strategic bidding*) che beneficiano di un contesto caratterizzato da forte asimmetria informativa [65]. I partecipanti alle aste possono infatti formulare offerte (*bid*) a prezzi che superano artificialmente i loro costi reali attesi [65], al fine di massimizzare il sussidio garantito dallo Stato, distorcendo in questo modo il mercato e gonfiando la spesa pubblica a carico del regolatore.

Nel disegno pratico di un CfD per i SAF, un'ulteriore categoria di attori coinvolti è quella dei gestori aereoportuali. Il report del Parlamento Europeo identifica, come effetto dell'adozione di questi contratti, un rischio di distorsione della produzione rispetto alla capacità reale di gestione degli aeroporti, incoraggiando quello che viene chiamato "*produce-and-forget approach*" [66]. L'installazione di infrastrutture supportate da contratti che garantiscano interamente il ricavo volumetrico spingerebbe gli operatori a produrre per "massimizzare i volumi di output" [66]. Tuttavia, per la complessa logistica di uno scalo aeroportuale (stoccaggio, miscelazione, oleodotti e stazioni di rifornimento), un incentivo tarato solo sul volume e non sulle dinamiche reali di mercato rischia di saturare l'infrastruttura aeroportuale con partite di SAF non coordinate con le effettive esigenze commerciali dei vettori operanti sullo scalo, aumentando i costi di gestione infrastrutturale complessiva.

L'introduzione di schemi di supporto pubblico basati su CfD o CCfD nell'aviazione comporta quindi una complessa calibrazione regolatoria, caratterizzata da un alto potenziale di de-risking ma, al contempo, da marcati rischi di distorsione dei segnali di mercato e delle dinamiche competitive [66].

La Tabella 10 propone una mappatura sistematica delle principali vulnerabilità intrinseche al design contrattuale e identifica, per ciascuna di esse, precise contromisure contrattuali e regolatorie. Tuttavia, tali strategie di mitigazione devono essere interpretate unicamente come proposte e potenziali opzioni di policy.

Stakeholder	Rischio identificato	Conseguenza operativa specifica	Strategia di mitigazione
Produttore	Rischio di deficit della capacità	Essendo il CfD un incentivo basato esclusivamente sulla produzione reale, un deficit di volumi azzera i flussi di cassa in entrata, lasciando l'operatore privo di copertura del debito (CAPEX) e per i costi fissi di impianto (OPEX)	**. Strumenti finanziari pubblici a supporto degli investimenti iniziali:** mitigazione a monte del debito iniziale attraverso l'erogazione di contributi pubblici in conto capitale e la concessione di garanzie statali sui finanziamenti privati [10]
Produttore	Rischio legato al prezzo dei *feedstock*	Uno *strike price* fisso non indicizzato espone l'operatore all'inflazione dei *feedstock*	**Indicizzazione dinamica dello s*trike price*:** inserimento di clausole contrattuali di indicizzazione dello *strike price* agganciate a indici di mercato internazionali dei *feedstock* biologici [17]
Autorità pubblica	Rischio fiscale	L'obbligo di erogazione di pagamenti compensativi può rappresentare un considerevole onere di bilancio	**Clausole di f*unding cap*:** definizione di tetti massimi di spesa annua complessiva per lo Stato [10] e imposizione di tetti anche alle offerte dei singoli partecipanti alle aste [65] per impedire che i produttori più efficienti ottengano rendite extra sproporzionate a spese dello stato
Autorità pubblica	Asimmetria Informativa	Le asimmetrie sui costi industriali reali permettono alle imprese di fare offerte strategiche opportunistiche per catturare rendite a spese del bilancio pubblico	**Verifica di congruità tramite progetti di riferimento:** verificare le offerte confrontandole direttamente con un calcolo analitico elaborato dal regolatore su progetti standard di riferimento di mercato per costringe l'operatore a svelare in modo trasparente la propria contabilità per giustificare la congruità del prezzo richiesto rispetto ai costi reali stimati, annullando il vantaggio informativo del privato

Gestori aereoportuali	Comportamento "produce-and-forget" dei produttori	Isolare l'operatore dai segnali di prezzo a breve termine lo spinge a massimizzare l'output fisico volumetrico indipendentemente dalle reali dinamiche della domanda o dalla saturazione logistica dello scalo aeroportuale	**Capacity-based CfD:** evolvere lo strumento remunerando la capacità teorica messa a disposizione anziché il solo volume erogato [66]

Tabella 10- Matrice di sintesi dei rischi, conseguenze e mitigazioni nel design dei CfD/CCfD.

Occorre precisare tuttavia che la combinazione ottimale delle misure come quelle presentate deve essere rigorosamente calibrata sulla base delle reali esigenze di mercato e delle condizioni favorevoli del particolare momento storico ed economico in cui vengono valutate. Variabili esogene quali la maturità tecnologica (TRL), la volatilità dei prezzi dei *feedstock*, le imposizioni normative e la gestione del bilancio pubblico impongono al *policy maker* ad adottare un approccio flessibile e progressivo. Un'architettura contrattuale modulare garantirebbe infatti la reattività necessaria per adattare le clausole all'evoluzione futura della *supply chain* e della logistica aeroportuale.

4.1.2 Bilancio dei vantaggi e svantaggi e dimensionamento quantitativo dello schema CfD/CCfD nel contesto nazionale

Al fine di operare una sintesi metodologica di queste misure economiche, il seguente capitolo si concentra su una valutazione analitica del suo impatto sul mercato dei SAF. La Tabella 11 offre a proposito una visione complessiva delle esternalità positive e vulnerabilità operative generate dall'adozione di questa infrastruttura contrattuale.

Vantaggi	Svantaggi e limiti
Bancabilità e de-risking dell'Offerta: stabilizza i ricavi a lungo termine (10-15 anni) per i produttori di SAF, riducendo la percezione del rischio a favore della bancabilità dei progetti	**Inefficacia sui rischi tecnologici FOAK:** eventuali fermi o ritardi nell'avvio degli impianti a basso TRL azzerano i flussi di cassa in entrata, lasciando l'operatore privo di copertura del debito e per i costi fissi di impianto
Tutela dei consumatori e dei vettori: il modello delle “pool" garantito dallo Stato potrebbe proteggere le compagnie aeree dalla volatilità dei prezzi dei SAF e prevenire che l'onere del mandato europeo si scarichi interamente sui passeggeri sotto forma di tariffe sproporzionate	**Esposizione fiscale dello Stato:** in assenza di tetti di spesa, lo Stato si espone a significativi oneri finanziari se i costi di produzione del SAF rimangono eccezionalmente elevati
Recupero di risorse pubbliche (Two-way): la formula bilaterale a due vie garantisce che se il prezzo di mercato del SAF supera lo *strike price* concordato, l'eccedenza finanziaria venga restituita allo Stato, eliminando i rischi di sovra-remunerazione dei beneficiari	**Spiazzamento del mercato privato:** CfD pubblici troppo generosi riducono l'incentivo per le imprese a negoziare contratti commerciali a lungo termine (come i PPA aziendali) sul mercato privato, bloccando lo sviluppo di dinamiche competitive libere

Incentivo alla logistica di scalo:	Distorsioni dei prezzi e comportamenti "produce-and-forget":
stimola la programmazione e lo sviluppo coordinato delle infrastrutture di ricezione, stoccaggio e miscelazione negli aeroporti in vista dei mandati di miscelazione	isolare i produttori dai segnali di prezzo reali può spingerli a immettere volumi anche in presenza di saturazione logistica, riducendo l'efficienza complessiva negli aeroporti

Tabella 11- Analisi dei pro e contro dell'adozione dei CfD/CCfD nella filiera aeronautica.

Questa matrice concettuale ci permette di interpretare la fattibilità reale dello strumento trovando un immediato ancoraggio quantitativo nelle simulazioni finanziarie elaborate dal Politecnico di Torino per il tavolo di consultazione del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (MIT). L'analisi di fattibilità sul contesto italiano, presentata nel documento, si apre con la misurazione del divario di prezzo reale (*Green Premium*) tra il SAF realizzati mediante la tecnologica HEFA e il cherosene fossile tradizionale, per il quale è stato assunto un prezzo di mercato pari a 500 euro per tonnellata.

Secondo lo studio, il divario unitario di prezzo è stimato in un range compreso tra 640 e 1.800 euro/ton. Tale oscillazione riflette la sensibilità della tecnologia HEFA al costo dei *feedstock* biologici, stimati dallo studio *"Recent advances on alternative aviation fuels/pathways: A critical review"*, pubblicato nell'anno 2023. Questo, infatti, rappresenta il 51-69% del costo operativo (OPEX) a causa dell'elevata volatilità sui mercati internazionali.

La valutazione del rischio di "esposizione fiscale dello Stato" (che compare come limite critico nella Tabella 11) è stata condotta dal Politecnico di Torino modellizzando la copertura totale dell'extra-costo del SAF tra il 2025 e il 2030 per adempiere ai mandati europei [10]. Considerando una crescita della domanda interna lineare fino a un volume cumulato di 1,02 milioni di tonnellate [10], lo studio propone un *mix* di strumenti in cui i CfD agiscono in combinazione con ulteriori leve di supporto, assorbendo lo scarto di prezzo netto non coperto dagli altri interventi (Figura 4.5 e Figura 4.5).

Il modello si articola su due scenari di sensitività estremi. Nello scenario favorevole (*Best Case*), mostrato in Figura 4.5, ipotizzando un costo industriale del SAF HEFA stabilizzato a 1.140 euro/ton (con un gap unitario residuo da coprire pari a 640 €/t), l'esborso cumulativo a carico del bilancio dello Stato per l'intero quinquennio si attesterebbe a 128,11 milioni di euro [10].

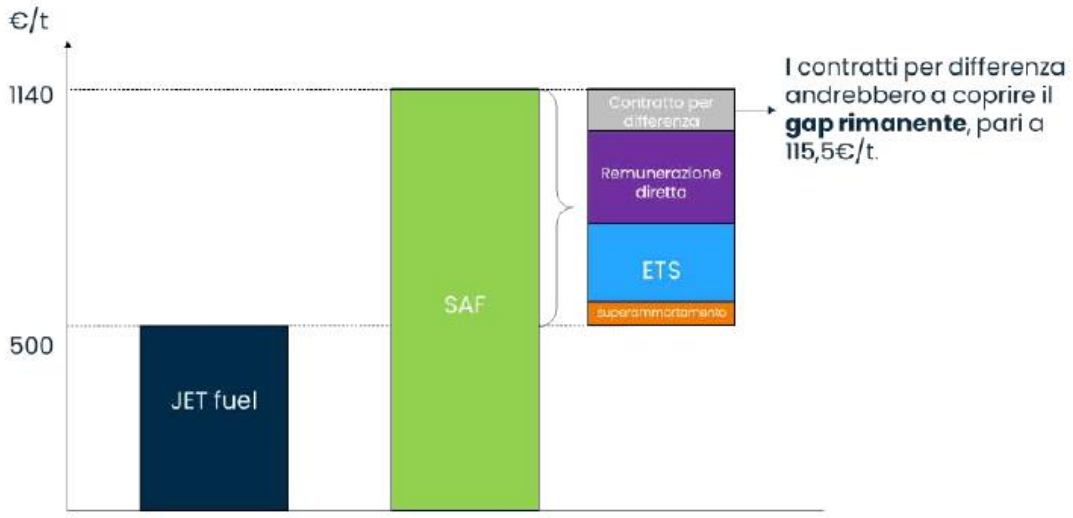


Figura 4.5- Scenario favorevole nel caso di gap di prezzo minimo.

Fonte: Politecnico di Torino (2025)[10].

Nello scenario sfavorevole (*Worst Case*) in Figura 4.6, nell'ipotesi di un aumento del costo delle materie prime biologiche che spinge il SAF HEFA a 2.300 euro/ton (dilatando il gap unitario a 1.800 €/t), l'onere finanziario complessivo per l'erario pubblico raggiungerebbe i 1.311 milioni di euro [10].

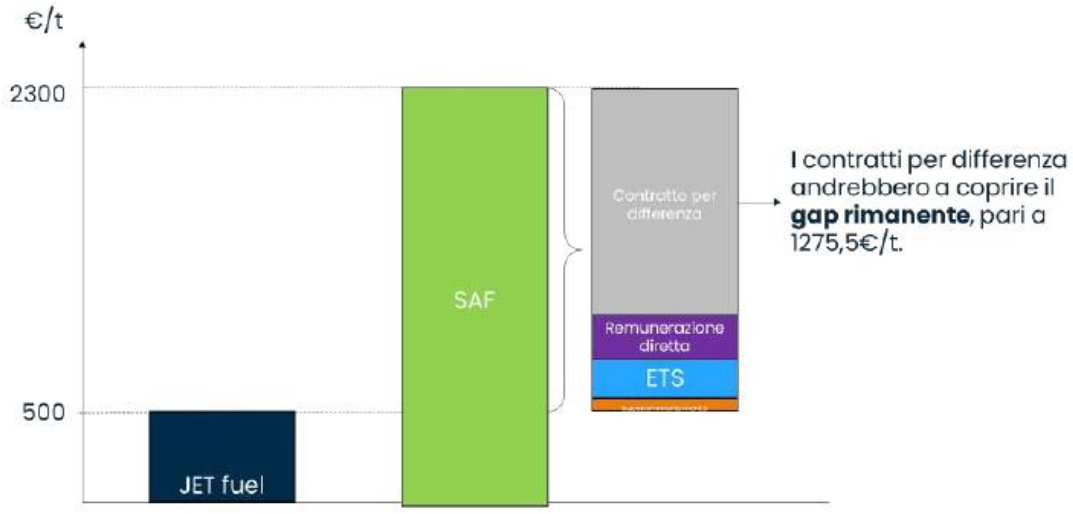


Figura 4.6- Scenario sfavorevole nel caso di gap di prezzo massimo.

Fonte: Politecnico di Torino (2025)[10].

Questi dati quantitativi dimostrano in modo rigoroso come la progettazione di un CfD, in assenza di tetti amministrativi alle offerte o di limiti di spesa complessiva (vedi Tabella 10), esponga il bilancio dello Stato a una potenziale passività ad alta variabilità, condizionata da fattori esogeni non governabili dal regolatore nazionale. Ciò rafforza la necessità di prevedere delle misure come l'indicizzazione dinamica dello *strike price* e l'integrazione di sussidi pubblici, che sono state presentate in precedenza come possibili strategie di mitigazione.

4.2 Il sistema "Book and Claim"

ll meccanismo del *Book and Claim* è stato l'argomento cardine della proposta presentata nel 2025 dall'Association of Asia Pacific Airlines perché permette di disaccoppiare la transazione economica dei benefici ambientali dall'effettiva fornitura logistica del combustibile fisico [68].

A differenza di altri sistemi di catena di custodia (mostrati in Figura 4.7), come la segregazione fisica o il bilanciamento di massa, in cui il lotto di combustibile sostenibile deve rimanere indissolubilmente legato alla filiera fisica di raffinazione, trasporto e blending, il modello *Book and Claim* è il sistema che riesce a garantire la maggiore flessibilità, operando una scissione concettuale tra la molecola di idrocarburo e i suoi attributi di sostenibilità ecologica [69].

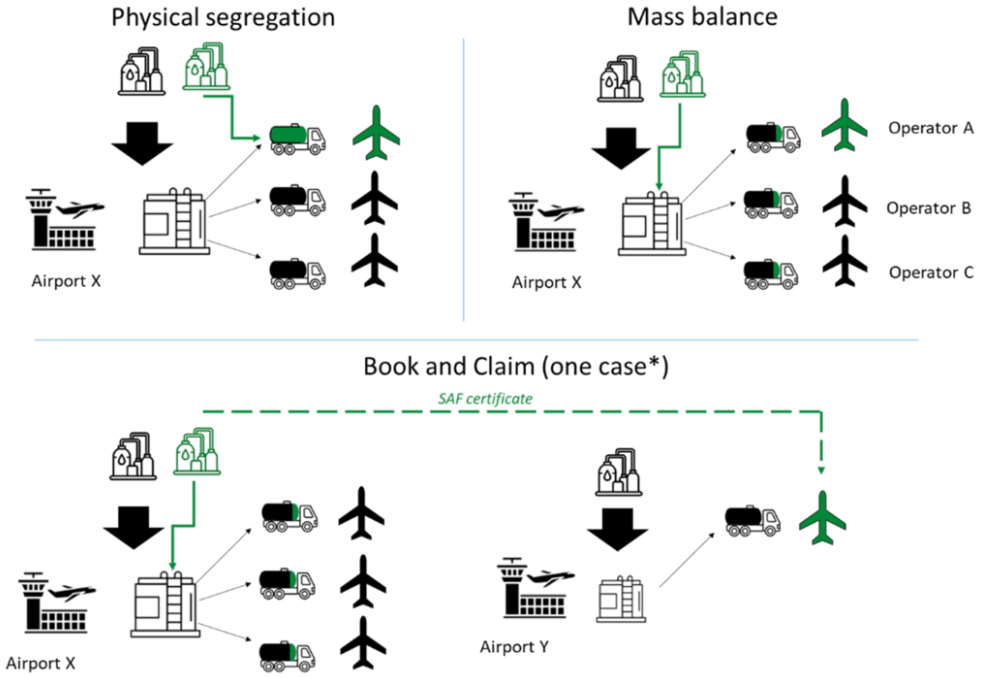


Figura 4.7- Modelli di catena di custodia dei SAF.

Fonte: ICAO (2026) [69].

Sotto il profilo operativo, il meccanismo si articola in una sequenza lineare come quella mostrata in Figura 4.7. Un produttore di SAF immette fisicamente un determinato quantitativo di carburante alternativo certificato secondo specifici standard di sostenibilità all'interno del sistema di stoccaggio e distribuzione di un aeroporto di partenza [70]. Il combustibile prodotto viene associato ad un certificato univoco [63] che ne attesta le caratteristiche di sostenibilità, quali la matrice di *feedstock* impiegata e la percentuale di abbattimento dei gas a effetto serra (*Greenhouse Gases* o GHG), e contestualmente viene tracciato all'interno di un registro digitale che ne abilita l'acquisto da parte di un *buyer* [70]. In Figura 4.8 è possibile vedere nel dettaglio i passaggi appena descritti. Contestualmente, un soggetto (ad esempio: un operatore aereo) operante in una qualunque altra area geografica acquista il corrispondente certificato

virtuale (SAFc) [10]. Attraverso l'acquisizione del titolo, il *buyer* riscatta il diritto legale di rivendicare (*claim*) il beneficio ambientale associato a quel lotto [68] raggiungendo così i propri obiettivi di sostenibilità [10] senza vincolare l'operatore al consumo diretto del biocarburante.



Figura 4.8- Spiegazione semplificata di come funziona il sistema di Book and Claim.

Fonte: https://noviqtech.com/articles/understanding-the-book-and-claim-model

4.2.1 Allocazione del rischio lungo la filiera dei SAF

L'adozione di un sistema di trasferimento degli attributi di sostenibilità tramite *Book & Claim* consentirebbe la strutturazione di un mercato virtuale dei SAF su scala nazionale e globale [71]. Superando la rigidità dei contratti bilaterali tradizionali, questo meccanismo si propone di favorire maggiore trasparenza e prezzi più competitivi [71].

Tuttavia, in occasione del recentissimo *Public Hearing on Book and Claim of Sustainable Aviation Fuels* organizzato dalla Commissione per i Trasporti e il Turismo (TRAN) del Parlamento Europeo, a maggio dell'anno in corso, sono emerse diverse vulnerabilità strutturali ed economiche. Durante questo tavolo di confronto, ciascun rappresentante della filiera industriale ha presentato le proprie aspettative ma anche riserve rispetto a un sistema di transizione regolata unicamente da logiche di scambio immateriali.

La filiera del combustibile, comprendente i produttori e i distributori industriali di SAF, affronta rischi strutturali legati alla bancabilità degli investimenti industriali di lungo termine. Come esposto chiaramente nella presentazione dell'aviation policy officer Camille Mutrelle durante il dibattito istituzionale, lo strumento del Book and Claim, pur facilitando la liquidità commerciale delle transazioni a breve termine, non rappresenta in alcun modo un motore di finanziamento o di de-risking strutturale per la filiera industriale [72]. Il mercato virtuale non è infatti in grado di neutralizzare il rischio di primo ingresso degli acquirenti (*offtaker first-mover risk*) [72] né di garantire quella prevedibilità dei flussi di cassa a lungo come previsto dall'applicazione dei contratti per differenza. A questo ostacolo finanziario si aggiunge un gravoso sovraccarico amministrativo e burocratico in capo ai produttori, costretti a gestire e rendicontare molteplici e incoerenti standard internazionali di sostenibilità dei *feedstock* a seconda del mercato geografico di destinazione dei certificati [10], in assenza di un sistema armonizzato dei certificati SAF [71].

L'allocazione del rischio in uno scenario di Book and Claim coinvolge anche la categoria dei gestori aeroportuali, i quali prevedono una totale polarizzazione logistica e geografica delle forniture fisiche. Come illustrato in sede europea dalla rappresentanza aeroportuale di Mr Westermair, lo svincolo virtuale consente di acquistare SAF prodotto in qualsiasi parte del mondo, innescando di fatto una corsa al ribasso (*race to the bottom*) in cui la produzione fisica dei biocarburanti si potrebbe concentrare unicamente in paesi dotati di *feedstock* e risorse energetiche a bassissimo costo [73] (vedi Figura 4.9), danneggiando in questo modo lo sviluppo della rete infrastrutturale a livello nazionale [64].



Figura 4.9- Estratto della presentazione di Mr Florian Westermair, Head of Sustainability, Munich Airport.

Fonte: https://www.europarl.europa.eu/committees/it/public-hearing-on-book-and-claim-of-sust/product-details/20260427CHE14122 [73].

I vettori aerei si trovano esposti a una duplice barriera di conformità regolatoria ed economica. Sotto il profilo normativo, il sistema di scambio delle quote di emissione dell'Unione Europea (EU ETS) presenta forti aree di incertezza giuridica e non riconosce ancora in modo sistematico i lotti di SAF acquistati tramite meccanismi virtuali [10]. Questo espone le compagnie aeree al rischio di vedersi rigettare i certificati virtuali e di perdere il diritto di non restituire le quote di emissione (allowances for C02) in seguito all'acquisto e utilizzo di SAF, subendo così un danno economico diretto [11]. Inoltre, poiché gli obblighi di miscelazione fisica sanciti dal regolamento europeo *ReFuelEU Aviation* e le correlate misure anti-tankering impongono tassativamente alle compagnie aeree di rifornirsi fisicamente con almeno il 90% del carburante necessario negli scali dell'Unione [16], lo schema virtuale non può in alcun modo sostituire o surrogare l'assolvimento dei mandati fisici obbligatori.

L'applicazione di questo sistema al contesto della filiera SAF si potrebbe tradurre in un'ulteriore minaccia finanziaria per gli operatori aerei che rischiano di subire pratiche commerciali scorrette da parte dei fornitori di carburante. Qualora, ad esempio, i fornitori fisici di carburante non riescano a rispettare i mandati di miscelazione, essi potrebbero ribaltare le sanzioni amministrative europee e i relativi costi logistici all'interno dei contratti per carburanti del tipo Jet A1 sotto forma di extra-costi opachi e non negoziabili, noti come *"black box surcharges"* [72], vanificando interamente per le compagnie aeree i benefici economici legati all'acquisto di SAFc sul mercato virtuale.

Infine, il Regolatore Pubblico e lo Stato si trovano a dover gestire rischi significativi legati all'integrità del mercato e alla governance del sistema di contabilizzazione [10]. Il pericolo principale è rappresentato dal doppio conteggio (*double counting* o *double claiming*) dei benefici ambientali, fenomeno che si verifica quando la riduzione delle emissioni viene rivendicata simultaneamente da due *end-user* distinti per l'assolvimento di obiettivi di emissione all'interno dello stesso *scope* [23]. Infatti, secondo il report pubblicato dalla IATA in cui viene discussa la metodologia di *accounting*, mentre la coesistenza di

rivendicazioni su scope differenti (*Scope* 1 per il vettore aereo e *Scope* 3 per il passeggero o cliente corporate [23]) è pienamente legittima, l'integrità contabile viene invece violata se due attori concorrenti (ad esempio: due diverse compagnie aeree) pretendono di registrare lo stesso lotto di SAF relativo al medesimo livello emissivo [68]. L'urgente necessità di garantire che ogni singolo certificato digitale (SAFc) possa essere emesso, trasferito e ritirato una sola volta all'interno di un'unica infrastruttura centralizzata [74] è stata esplicitamente formalizzata durante la presentazione del vicepresidente ESG Accounting, Reporting & Controlling della società DHL Express esposta davanti la commissione TRAN del Parlamento Europeo. Per mitigare questo rischio e prevenire fenomeni di frode, che distruggerebbero la fiducia dell'opinione pubblica [16], le autorità pubbliche nazionali ed europee dovrebbero farsi carico dello sviluppo e della gestione di un'infrastruttura digitale estremamente complessa, centralizzando ad esempio le transazioni all'interno della *Union Database for Biofuels* (UDB) [74] e imponendo una sincronizzazione obbligatoria in tempo reale tra i registri nazionali.

Ad oggi, infatti, esistono diversi registri digitali, essenziali per abilitare i sistemi di *Book and Claim* [23], e che consento di tracciare in modo sicuro le fasi di emissione, trasferimento e annullamento finale dei certificati SAFc [23]. In Tabella 12 sono disponibili solo alcuni di questi.

Registro SAF	Istituzione fondatrice
RSB Registry	Roundtable on Sustainable Biomaterials Association (RSB)
SAFc Registry	Sustainable Aviation Buyers Alliance (SABA)
ISCC Credit Transfer System	International Sustainability and Carbon Certification (ISCC) initiative
IATA SAF Registry	International Air Transport Association (IATA)
Assure SAF Registry	Assure SAF
Union Database (UDB) & Registri Nazionali	Commissione Europea / Stati Membri dell'Unione Europea

Tabella 12- Lista di alcuni registri digitali di SAF su scala interazionale.

Applicando il medesimo schema di ripartizione dei rischi adottato per i contratti per differenza, la Tabella 13 che segue sintetizza le criticità emerse lungo la filiera e le relative strategie di mitigazione.

Stakeholder	Rischio identificato	Conseguenza operativa specifica	Strategie di mitigazione
Produttori	Inefficacia dello strumento nell'incentivare gli investimenti iniziali	Lo strumento non offre una garanzia dei ricavi necessaria a sbloccare il finanziamento di debito bancario per la costruzione di impianti industriali complessi e ad altissimo CAPEX	**Policy di supporto per finanziamenti:** integrare l'ecosistema B&C con politiche di supporto o Contratti per Differenza (CfD) di durata coerente con il *time to market* delle tecnologie
Autorità pubblica	Rischio di doppio conteggio e frodi	Rivendicazione simultanea del medesimo beneficio ambientale associato a un singolo lotto di SAF, con conseguente perdita di integrità del sistema di tracciamento e gestione dei flussi informativi	**Definizione di un'unica infrastruttura digitale centralizzata:** centralizzazione amministrativa dei registri di transazione e sincronizzazione obbligatoria dei database volontari per garantire il tracciamento e il ritiro univoco dei certificati

Operatori aerei	Incertezza di conformità regolatoria	Il sistema EU ETS riconosce i benefici ambientali solo in presenza di un rifornimento fisico Impossibilità di usare il B&C per assolvere agli obblighi fisici del regolamento ReFuelEU Aviation	**Armonizzazione regolatoria:** apertura di un confronto regolatorio a livello di Commissione Europea per includere i sistemi di certificati digitali negoziabili nel regolamento ufficiale
Operatori aerei	Rischio di imposizione di sovrapprezzi opachi da parte dei produttori	Esposizione a pratiche di "black box surcharges", in cui i fornitori di carburante caricano le sanzioni e i costi logistici della miscelazione fisica direttamente sui contratti di carburante Jet A1	**Clausole contrattuali di trasparenza:** standardizzazione internazionale e trasparenza delle clausole contrattuali di fornitura per esplicitare le voci di costo
Gestori aereoportuali	Polarizzazione logistica	Poiché i certificati virtuali permettono di acquistare SAF prodotto ovunque, la produzione si potrebbe concentrare dove i feedstock e i costi industriali sono inferiori, rischiando di marginalizzare gli aeroporti minori o situati in aree periferiche che rimarrebbero privi di investimenti locali per l'adeguamento delle infrastrutture	**Limitazione progressiva dell'uso dei certificati:** Con il maturare della filiera, la quota ammessa tramite certificati virtuali decresce a favore dell'obbligo di miscelazione fisica in loco, costringendo i fornitori a investire nelle infrastrutture fisiche di SAF

Tabella 13- Matrice di sintesi dei rischi, conseguenze e mitigazioni nel design del sistema di Book & Claim.

4.2.2 Analisi comparativa dei vantaggi e svantaggi

Diversi sono i vantaggi relativi all'applicazione di questo schema al mercato dei SAF e alla conseguente diffusione dei certificati virtuali. Sotto il profilo della logistica e distribuzione dei carburanti alternativi, il meccanismo di *Book and Claim* è stato presentato da Camille Mutrelle, durante il dibattito *Public Hearing on Book and Claim of Sustainable Aviation Fuels*, come una soluzione promettente per superare i colli di bottiglia fisici della catena di fornitura [72], introducendo efficienze ambientali e contabili che verranno discusse nel seguente capitolo.

L'adozione di questo modello virtuale si traduce infatti in una drastica riduzione delle barriere fisiche e dei costi distribuiti lungo la filiera. Come evidenziato nel report redatto dal Politecnico di Torino per il Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, il meccanismo di separazione tra la transazione commerciale dei benefici ambientali e l'effettiva consegna fisica del carburante consente un accorciamento delle catene logistiche e una riduzione dei costi operativi complessivi [10] di cui viene fornita una panoramica in Figura 4.10. Limitando la necessità di trasportare fisicamente il combustibile liquido a lungo raggio, si contengono gli impatti ambientali associati alla movimentazione terrestre del carburante, migliorando così la sostenibilità ecologica della filiera [10].

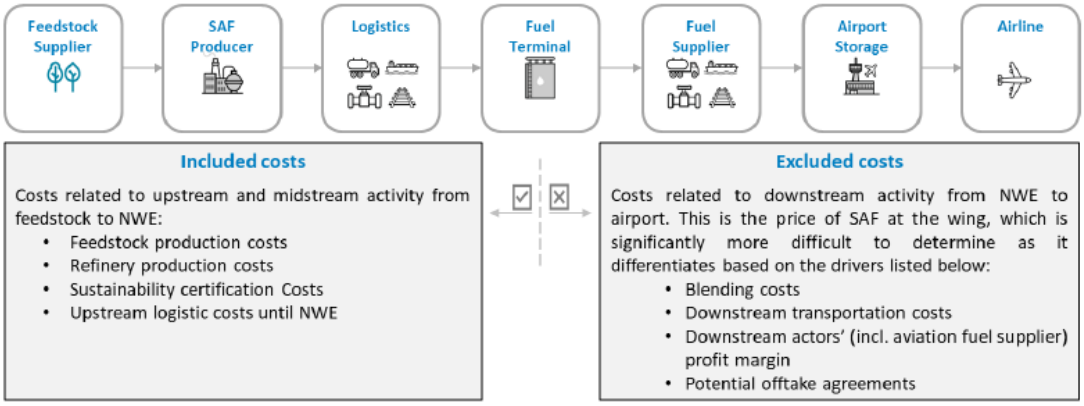


Figura 4.10- Panoramica dei costi inclusi ed esclusi nella valutazione del prezzo di riferimento dei SAF.

Fonte: EASA (2025) [15].

Dal punto di vista della logistica, lo schema di *Book and Claim* svincolerebbe le compagnie aeree dalla prossimità geografica con gli impianti di produzione dei SAF [10], ampliando la base commerciale dei produttori rispetto alle convenzionali catene fisiche di fornitura. In base alle analisi del World Economic Forum (WEF, 2025), il meccanismo abilita la partecipazione di organizzazioni esterne al settore aeronautico, interessate all'abbattimento delle proprie emissioni di Scope 3 [23]. Molto spesso, infatti, le aziende registrano un volume significativo di emissioni indirette derivanti proprio dai viaggi d'affari dei dipendenti (*corporate travel*) [23]. L'integrazione della domanda *corporate* incrementerebbe i volumi negoziati rafforzando la bancabilità complessiva dei progetti di filiera.

Nel breve-medio periodo, questo schema si profila come una soluzione transitoria ma indispensabile per trainare la domanda di SAF, diversificare i flussi di cassa dei produttori [23] e ripartire il sovrapprezzo (*Green Premium*) su una platea più ampia di stakeholder [23]. La Conferenza dei Direttori Generali dell'Aviazione Civile (DGCA), nel *Discussion Paper* dedicato alla promozione dei sistemi di *Book and Claim*, enfatizza a proposito che questo meccanismo non costituisce un sostituto permanente per lo sviluppo dell'approvvigionamento fisico di SAF [68], bensì si configura come uno strumento complementare volto ad accelerare l'adozione del carburante sostenibile mentre le infrastrutture e le capacità produttive maturano nelle diverse aree geografiche [68].

La rilevanza di tale flessibilità trova indirettamente riscontro nelle analisi della IATA dedicate all'accesso dei nuovi produttori di SAF alle infrastrutture fisiche di rifornimento già presentate nel capitolo 4. Il brief della IATA segnala infatti che la gestione delle infrastrutture di stoccaggio (*fuel farm*) attraverso modelli a consorzio può ostacolare l'ingresso di nuovi attori a causa degli elevati costi d'ingresso e dei complessi processi di approvazione [56]. All'interno dello stesso *paper*, ad esempio, viene riportato il caso dell'aeroporto di Sydney in cui le condotte upstream, collegate direttamente alla *fuel farm* aeroportuale, sono di proprietà di compagnie private [56]. Dunque, un eventuale fornitore emergente intenzionato a immettere SAF nello scalo sarebbe costretto a utilizzare mezzi di trasporto alternativi che renderebbero la logistica estremamente costosa, incrementando al contempo le emissioni di trasporto [56].

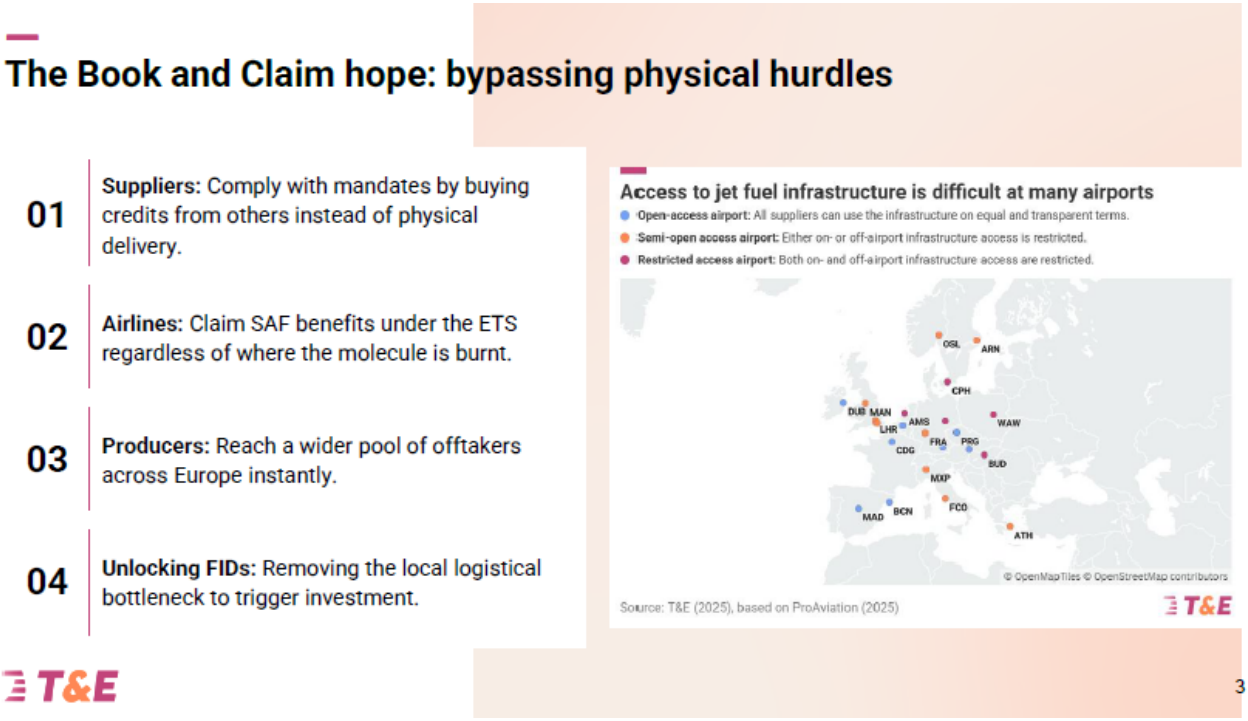


Figura 4.11- Estratto della presentazione di Camille Mutrelle, Aviation Policy Officer.

Fonte: https://www.europarl.europa.eu/cmsdata/306143/MsMutrelle_TRANpublichearing_EN.pdf [72].

Di fronte a simili restrizioni d'accesso alle infrastrutture, che rischiano di ridurre la distribuzione dei carburanti [56], il sistema di *Book and Claim* si propone di facilitare la transizione energetica.

Nonostante le indubbie potenzialità commerciali, l'effettiva applicazione di un mercato virtuale dei SAF introduce un quadro estremamente complesso di rischi per tutti gli attori della catena del valore aeronautica che sono stati già presentati nel paragrafo dedicato alla loro allocazione. Al fine di condensare i diversi profili analitici discussi, la
Tabella 14 propone una matrice di sintesi che riassume le opportunità offerte dallo schema virtuale rispetto ai limiti regolatori ed economici.

Vantaggi	Svantaggi e limiti
Superamento dei vincoli geografici: consente ai vettori aerei di acquistare gli attributi ambientali dei SAF senza essere legati alla presenza fisica del combustibile negli scali di partenza	**Rischio di disincentivo infrastrutturale:** se non associato a solidi quadri di policy regionali, lo svincolo virtuale permanente rischia di rallentare o bloccare la realizzazione di infrastrutture fisiche sul territorio nazionale
Efficientamento delle catene logistiche: riduce drasticamente le distanze di movimentazione terrestre del carburante, limitando le emissioni di carbonio associate al trasporto a lungo raggio e abbassa i costi di gestione della *supply chain*	**Polarizzazione geografica della produzione:** rischio che la raffinazione fisica si concentri esclusivamente nei paesi caratterizzati da minori costi energetici e di *feedstock*, penalizzando lo sviluppo industriale locale delle altre nazioni

Doppia valorizzazione dell'attributo di sostenibilità (Scope 1 e Scope 3): è concessa la rivendicazione simultanea e coordinata dei benefici per Scope 1 e Scope 3 a partire dallo stesso lotto fisico di SAF, incrementando l'incentivo economico e la partecipazione di molteplici stakeholder lungo la filiera	**Rischio di doppio conteggio:** uno stesso lotto di SAF rischia di essere rivendicato contemporaneamente per Scope 1 e Scope 3, in assenza di regole rigide di annullamento sequenziale dei certificati
Ripartizione del *green premium* e diversificazione dei ricavi: consente di distribuire l'extra-costo del combustibile sostenibile su un bacino molto più ampio di stakeholder e di attrarre flussi finanziari aggiuntivi a favore dei produttori, stimolando la crescita della domanda globale	**Assenza di un registro digitale globale:** richiede la costituzione di una complessa e pesante infrastruttura digitale di controllo da cui partire per poter poi modellare standard contro i rischi di frodi o irregolarità contabili

Tabella 14- Analisi dei pro e contro dell'adozione di un sistema B&C nella filiera aeronautica.

4.3 Regolazione e leve operative nel sistema aeroportuale

Esaminate le misure economiche e regolatorie a livello statale a supporto della transizione ecologica e dello *scale-up* dei SAF, l'analisi si sposta sulla progettazione di schemi di incentivazione promossi direttamente dai gestori aeroportuali. L'implementazione di tali interventi a livello di scalo deve tuttavia confrontarsi con precisi vincoli di compatibilità giuridica ed economica.

4.3.1 Tariffe aeroportuali sub-articolate

Tra gli incentivi applicabili a livello locale, la revisione delle tariffe aeroportuali costituisce uno strumento ampiamente riconosciuto dai quadri regolatori nazionali per incentivare la decarbonizzazione delle operazioni di volo.

L'Ente Nazionale per l'Aviazione Civile (ENAC), in un suo studio dedicato alla definizione di una roadmap nazionale per i Sustainable Aviation Fuels (SAF), dichiara che una delle linee d'azione suggerite dagli stakeholder coinvolti nella ricerca consiste nel rivedere la composizione tariffaria e la tassazione dello scalo [64]. Questo intervento, volto a premiare le compagnie aeree che scelgono di utilizzare quote certificate di carburante sostenibile può essere integrato nei contratti di programma stipulati tra l'ente regolatore e le società di gestione aeroportuale [64]. Tale orientamento in Italia, trova riscontro anche nella pianificazione governativa del Piano Nazionale degli Aeroporti (PNA), redatto con il Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (MIT) a giugno di questo anno. Nel documento, la modulazione tariffaria è indicata come prassi consolidata, fermo restando l'obbligo per i gestori di assicurare la piena non-discriminazione tra i vettori [75].

Fatto salvo il divieto di trattamenti discriminatori sancito dall'articolo 15 della Convenzione di Chicago [10], il quadro regolatorio della Delibera ART (Autorità di Regolazione dei Trasporti) n. 38/2023 legittima la differenziazione tariffaria qualora risponda a obiettivi di sostenibilità ambientale [76]. Nello

specifico, ai sensi della Misura 11 (punto 2), le società di gestione possono modulare i diritti applicati ai servizi aeroportuali per classi, in relazione all'impatto sonoro e di inquinamento [76].

Dal punto di vista operativo, qualsiasi modifica dell'assetto tariffario deve seguire l'iter prescritto dall'Atto di regolazione dell'ART. Il gestore è infatti tenuto a condurre una consultazione formale con gli utenti dello scalo [76], previa comunicazione all'Autorità, corredando la proposta con un "*documento di consultazione*" che espliciti e giustifichi i criteri adottati per l'eventuale sub-articolazione [76].

Questo meccanismo ha trovato una prima implementazione operativa nell'iniziativa promossa dal gestore SEA. Dal 1° luglio 2025, la società di gestione di Milano Linate e Malpensa ha introdotto un sistema di tariffe modulati sull'impatto sonoro ed emissivo degli aeromobili, differenziati per fascia oraria diurna e notturna [77]. Denominate "*Green Charges"*, tali tariffe ridefiniscono i diritti di atterraggio e decollo su parametri oggettivi quali peso, emissioni di NOx, e rumore. Pur non erogando incentivi diretti a chi acquista SAF, il caso milanese costituisce un precedente tangibile di differenziazione tariffaria su base ecologica.

Nel quadro della regolazione vigente, la differenziazione dei diritti di scalo per classi emissive costituisce dunque una leva chiave per penalizzare le flotte più inquinanti (come dimostrato dal gestore SEA) e potenzialmente incentivare l'uso dei SAF. Poiché la normativa impone il vincolo di neutralità economica annuale[5] a carico del gestore aeroportuale [76], l'attivazione di una *Regulatory Sandbox* consentirebbe di testare empiricamente la tenuta di uno schema che verifichi la reale capacità delle maggiorazioni applicate alle flotte inefficienti di compensare gli sgravi concessi ai voli più sostenibili.

La previsione di sub-articolazioni tariffarie per i biocarburanti solleva tuttavia un paradosso logistico e regolatorio per gli scali minori o regionali, esclusi nel breve periodo dalle forniture fisiche di SAF per ragioni di scala, connettività o vincoli economici. Per colmare tale divario, la leva tariffaria deve operare in combinazione con il modello *Book & Claim.* Infatti, in un quadro di regolazione multilivello, il vettore operativo sullo scalo regionale, acquistando quote virtuali di SAF mediante certificati negoziabili (SAFc), assicura l'immissione fisica di quel carburante nella rete logistica di un grande hub. L'esibizione della documentazione certificata al gestore locale legittima così l'applicazione dello sconto sui diritti aeroportuali.

Tale impostazione si allinea alle direttrici del Piano Nazionale degli Aeroporti (PNA) che si propongono di superare la frammentazione infrastrutturale aggregando gli scali nazionali in 13 sistemi integrati secondo logiche di complementarità territoriale e con-accessibilità [75]. In tale architettura, l'adozione di tariffe coordinate di sistema consentirebbe una divisione funzionale dei compiti. Mentre il grande hub si fa carico della gestione centralizzata della logistica fisica di distribuzione e stoccaggio dei SAF, lo scalo regionale applica tariffe ecologiche per allinearsi alle performance ambientali complessive del sistema.

A tale dinamica si affianca un ulteriore vantaggio: l'articolazione tariffaria prevista dalla Misura 11, premiando l'efficienza della flotta a discapito dei velivoli obsoleti, stimola il ricambio del parco aeromobili sulle rotte regionali. Ciò genera ricadute ambientali positive e quantificabili sul territorio circostante, indipendentemente dalla disponibilità fisica di SAF in rampa.

[5] Il vincolo di neutralità economico-finanziaria è sancito dall'Atto di regolazione di ART (Delibera n. 38/2023).

Al fine di completare la valutazione di fattibilità economica e regolatoria, seguendo la stessa metodologia di analisi adottata per i CfD e il sistema *Book & Claim*, vengono di seguito riportate le tabelle relative all'allocazione dei rischi con le rispettive proposte di mitigazione (Tabella 15) e dei principali vantaggi e svantaggi (Tabella 16) legati all'applicazione delle sub-articolazioni tariffarie.

Stakeholder	Rischio identificato	Conseguenza operativa specifica	Strategia di Mitigazione
Gestori aeroportuali	Mancata neutralità economico-finanziaria delle sub-articolazioni	Deviazioni significative tra il traffico stimato e quello reale (es. eccesso di voli a tariffa scontata) possono erodere i ricavi programmati del gestore	**Applicazione di compensazioni ex-post:** revisione annuale delle componenti tariffarie basata sul confronto tra preconsuntivi e consuntivi di traffico per compensare le differenze con incrementi o riduzioni della tariffa dell'anno successivo
Gestori aeroportuali	Asimmetria informativa e opportunismo degli utenti	Rischio che i vettori trasmettano stime di flotta ed emissioni non veritiere ex-ante per ottenere tariffe d'accesso più favorevoli	**Obblighi informativi ex-ante e sanzioni di veridicità:** obbligo per i vettori di trasmettere ex-ante le previsioni di traffico e i relativi standard acustici e atmosferici, con vigilanza di ART ed ENAC sulla veridicità dei dati forniti, pena il recupero delle somme e conguagli correttivi
Operatori aerei	Penalizzazione logistica degli scali regionali	Vettori operanti in aeroporti regionali, sprovvisti di infrastrutture fisiche per la gestione di SAF, rimangono esclusi dalle tariffe agevolate	**Sinergia tra Tariffe di Sistema e Book & Claim:** l'integrazione di sconti tariffari collegati a certificati *Book & Claim* virtuali (SAFc) consente ai vettori degli scali regionali di riscattare le agevolazioni senza necessitare di infrastrutture fisiche in loco
Autorità pubblica	Contenziosi legali e antitrust per discriminazione tariffaria	Ricorsi dei vettori aerei contrari alle sub-articolazioni tariffarie o alle rimodulazioni per asimmetria competitiva	**Trasparenza e consultazione pubblica preventiva:** obbligo di pubblicazione delle modifiche agli schemi tariffari sul portale ufficiale del gestore aereoportuale in seguito all'autorizzazione delle autorità coinvolte nel processo di consultazione e valutazione della proposta

Tabella 15- Matrice di sintesi dei rischi, conseguenze e mitigazioni nel design del sistema di sub-articolazione delle tariffe aeroportuali.

Vantaggi	Svantaggi e limiti
Vincolo di neutralità economico-finanziaria: tale principio impone che gli sconti tariffari concessi ai vettori che imbarcano carburanti sostenibili siano matematicamente compensati da penalizzazioni a carico dei vettori che operano con aeromobili a elevate emissioni, senza generare alcun onere per la finanza pubblica e alterazione dell'equilibrio di bilancio complessivo della società di gestione dello scalo	**Marginalità rispetto al Green Premium e rischio di disincentivo infrastrutturale:** lo sconto sui diritti aeroportuali è di natura locale e copre una frazione dell'elevato extra-costo del carburante. Dunque, se l'extra-costo associato ai SAF viene trasferito sul prezzo finale del biglietto, i clienti tenderanno a privilegiare i vettori che non impiegano SAF, i cui biglietti risulteranno più economici
Incentivo finanziario all'efficientamento del parco aeromobili: beneficio finanziario diretto, sotto forma di riduzione delle tasse di atterraggio e decollo, che premia i vettori che investono in flotte che imbarcano SAF	**Marginalizzazione logistica locale:** i vettori basati in aeroporti minori o regionali privi di logistica di stoccaggio e miscelazione fisica SAF non possono accedere alle tariffe agevolate, subendo una penalizzazione competitiva
Garanzia di parità di trattamento: il controllo preventivo di ART ed ENAC assicura che le differenziazioni tariffarie siano basate su requisiti oggettivi e non discriminatori, prevenendo asimmetrie competitive	**Elevata esposizione al contenzioso:** elevato rischio di opposizione legale e ricorsi da parte dei vettori contrari alle rimodulazioni in sede di Comitato Utenti, rallentando l'approvazione delle tariffe

Tabella 16- Analisi dei pro e contro dell'adozione di sub-articolazioni delle tariffe aereoportuali per incentivare l'utilizzo dei SAF.

4.3.2 Prioritizzazione ecologica nell'allocazione degli slot aeroportuali

L'azione degli aeroporti a supporto dei SAF non si limita alla rimodulazione dei diritti di scalo, ma può estendersi alla gestione operativa dei flussi di traffico. Introdurre nella pianificazione aeroportuale meccanismi premiali che favoriscano i vettori impegnati nell'abbattimento delle emissioni, consente di trasformare l'accesso agli slot aereoportuali in un driver diretto di sostenibilità. In Italia, l'assegnazione e il monitoraggio degli slot sugli aeroporti nazionali coordinati sono affidati in via esclusiva ad Assoclearance, associazione indipendente e senza scopo di lucro dotata di personalità giuridica [78]. Tuttavia, l'attuazione di un simile modello richiede di apportare modifiche al rigido quadro normativo che ad oggi regola la loro distribuzione tra i vettori aerei.

Partendo dalla definizione di banda oraria, essa rappresenta l'autorizzazione formale concessa a un vettore per utilizzare l'intera gamma delle infrastrutture aeroportuali necessarie ad atterrare o decollare in uno scalo coordinato in una data e ora specifiche [79]. Al fine di garantire trasparenza e parità di trattamento, l'assegnazione ordinaria degli slot è disciplinata a livello comunitario dal Regolamento (CEE) n. 95/93, successivamente modificato dal Regolamento 793/2004. Tale architettura regolatoria

poggia su principi consolidati che, nell'impostazione tradizionale, prescindono del tutto da parametri di prestazione ambientale. Il primo è rappresentato dai diritti storici, comunemente noti come *Grandfather Rights* [80], che riconoscono una preferenza assoluta nell'assegnazione delle bande orarie alle compagnie aeree che hanno operato storicamente quei medesimi voli [79]. Il secondo pilastro è la regola dell'80-20, comunemente definita "*use-it-or-lose-it"* [80] , ai sensi della quale un vettore conserva il diritto all'uso storico dello slot per la stagione corrispondente successiva solo a condizione di averlo effettivamente operato per almeno l'80% della serie programmata [79]. Infine, le bande orarie che residuano, vengono restituite dalle compagnie o nascono in seguito ad un ampliamento della capacità dell'aeroporto, confluiscono in un *pool* comune di scalo, il cui 50% deve essere assegnato ai nuovi concorrenti [79].

Il Regolamento (CEE) n. 95/93 e i suoi aggiornamenti prevedono la possibilità di introdurre criteri ambientali nelle regole di assegnazione degli slot. L'articolo 5 della delibera [6] stabilisce infatti che il comitato di coordinamento può proporre linee direttrici locali per l'assegnazione delle bande orarie, tenendo conto anche di "*eventuali preoccupazioni sotto il profilo ambientale*" [79] (art. 5, lettera a, quarto trattino, art. 8, paragrafo 5).

Sul piano internazionale, il quadro normativo europeo si raccorda con lo standard industriale definito dalle *Worldwide Airport Slot Guidelines* (WASG), redatte congiuntamente da IATA, ACI e WWACG. L'Edizione 4 delle WASG introduce specifiche disposizioni che offrono un margine di flessibilità per integrare criteri ecologici nelle procedure di allocazione delle bande orarie, attraverso:

- la **clausola ambientale** (WASG 8.4.1, lettera g - *Environment*): che impegna i coordinatori a tenere conto dei parametri di sostenibilità nell'assegnazione degli slot disponibili [81].
- la **clausola delle regole locali (**WASG 8.4.1, lettera h - *Local Guidelines*): che impone al coordinatore l'obbligo di tenere conto delle linee direttrici locali, laddove esistano, purché siano state preventivamente approvate dal Comitato di Coordinamento dello scalo o da un organismo equivalente [81].

Sotto il profilo procedurale e secondo quanto documentato nella circolare EAL-18 dell'ENAC (2009), l'introduzione di una modifica alle bande orarie, come quella suggerita in questa trattazione, richiede una proposta formalizzata dal Comitato di Coordinamento Aeroportuale e che sia successivamente trasmessa all'ENAC [78]. Spetta poi alla competenza della Direzione Aeroportuale rilasciare il formale nulla osta amministrativo per rendere esecutivi i nuovi criteri prima delle Conferenze degli Orari IATA [78].

Il principale ostacolo all'introduzione strutturale di queste innovazioni risiede nell'elevata incertezza operativa e di mercato che esse comportano. Per superare tali resistenze, lo sviluppo di una *regulatory sandbox* applicata a questo strumento, consentirebbe di sperimentare, in un ambiente controllato e per un arco temporale definito, nuovi criteri di prioritizzazione a favore dei vettori che impiegano quote certificate di SAF o aeromobili a ridotto impatto acustico ed emissivo. Tale regime sperimentale persegue infatti un duplice obiettivo: da un lato, valutare la reattività del mercato a fronte di un incentivo

[6] *"Le funzioni del comitato di coordinamento sono le seguenti:*

a) presentare proposte o fornire consulenza al coordinatore e/o allo Stato membro in merito ai seguenti punti:

...

-linee direttrici locali per l'assegnazione di bande orarie o il controllo dell'utilizzazione delle bande orarie assegnate, che tengono conto, tra l'altro, di eventuali preoccupazioni sotto il profilo ambientale, a norma dell'articolo 8, paragrafo 5"

prettamente operativo, dall'altro, raccogliere evidenze empiriche per tarare il quadro regolatorio in accordo con le autorità di vigilanza, preservando la parità competitiva e la qualità del servizio per i passeggeri.

La progettazione della sandbox aeroportuale richiede una rigorosa mappatura delle vulnerabilità regolatorie e di mercato, per questo motivo, in conformità alle linee guida dell'*OECD Regulatory Sandbox Toolkit* è stata fornita una sintesi delle analisi nelle matrici che segue.

Stakeholder	Rischio identificato	Conseguenza operativa specifica	Strategia di Mitigazione
Gestori aeroportuali	Rischio di inefficienza e congestione della capacità dello scalo	L'alterazione dell'allocazione ordinaria per introdurre priorità ecologiche basate sul SAF rischia di generare sotto-ottimizzazioni temporanee nell'uso delle infrastrutture di volo e di pista nei momenti di picco, esacerbando le criticità relative alla capacità e compromettendo gli indici generali di puntualità dello scalo	**Definizione di una percentuale massima di slot sotto sperimentazione:** porre un limite massimo e predefinito alla quota di capacità del pool assegnabile tramite criteri ambientali sotto il diretto controllo di Assoclearance
Operatori aerei	Rischio di concorrenza asimmetrica	I vettori minori o regionali, caratterizzati da minori disponibilità finanziarie o dall'assenza fisica di SAF nello scalo di origine, rischiano l'emarginazione operativa e l'esclusione dalle bande orarie green, a vantaggio delle grandi compagnie aeree basate negli hub principali.	**Integrazione di un sistema di *Book & Claim*:** verrà valutata l'integrazione di criteri di flessibilità virtuale che consentono ai vettori di riscattare la priorità ecologica esibendo certificati di acquisto virtuale di SAF tramite sistemi di *Book & Claim* si prevede l'avvio del test su scala ridotta esclusivamente su rotte nazionali predefinite per monitorare gli impatti competitivi prima di estensioni su larga scala in caso di successo dell'esperimento
Coordinatore dello Slot (Assoclearance)	Rischio legale e contenzioso amministrativo per violazione del principio di non-discriminazione	La deroga ai diritti storici espone il coordinatore a ricorsi giudiziari e sanzioni da parte dei vettori che denunciano una discriminazione nell'accesso allo scalo	**Limitazione del perimetro di azione e verifica preliminare dell'autorità garante:** Assegnazione delle bande appartenenti al solo pool comune senza compromettere i diritti storici degli altri vettori aerei, previa autorizzazione del Dirigente della Direzione Aeroportuale dell'ENAC

Autorità pubblica	Rischio di asincronia di rete	Uno slot prioritario concesso a livello locale in Italia rischia di non trovare corrispondenza nello scalo estero, spingendo i vettori di lungo raggio a deviare il traffico verso hub extra-UE con minori obblighi ambientali	**Exit plan:** L'attivazione della sandbox richiede la sottoscrizione ex-ante di un protocollo d'intesa vincolante che sancisce l'assoluta temporaneità del test e la reversibilità immediata delle deroghe in caso di distorsione del sistema

Tabella 17- Matrice di sintesi dei rischi, conseguenze e mitigazioni nel design di un sistema di prioritizzazione degli slot aeroportuali.

Vantaggi	Svantaggi e limiti
Indipendenza dalle risorse finanziarie dello stato: offre un vantaggio competitivo non monetario di grande impatto e a costo zero per le finanze pubbliche a favore dei vettori che decidono di utilizzare i SAF	**Esclusione competitiva dei piccoli vettori:** i vettori minori rischiano di subire una penalizzazione ed essere esclusi dalle bande orarie green se sprovvisti della capacità logistica o delle risorse finanziarie necessarie per rifornirsi di SAF
Incentivo che alimenta la competitività dei SAF: riconosce la sostenibilità ambientale come una vera e propria dimensione di concorrenza commerciale tra i vettori aeroportuali, rendendo economicamente razionali gli investimenti delle compagnie volti a decarbonizzare le proprie flotte	**Complessità dei modelli di capacità e oneri di coordinamento:** l'allocazione delle bande orarie basata su parametri ecologici introduce elementi di distorsione nella pianificazione della capacità che non sono facilmente quantificabili

Tabella 18- Analisi dei pro e contro dell'adozione di un sistema di prioritizzazione degli slot aeroportuali.

5 Caso studio: simulazione del processo di costruzione di una sandbox

Il presente capitolo è dedicato alla formulazione e alla strutturazione di un'architettura operativa tipo di una *regulatory sandbox* nazionale in grado di guidare l'autorità pubblica nella sperimentazione sul campo di incentivi innovativi volti ad accelerare la decarbonizzazione del trasporto aereo e a favorire l'adozione dei carburanti sostenibili d'aviazione.

La trattazione si apre con un'analisi multicriterio approfondita, concepita per valutare e ponderare le diverse leve economiche e regolatorie che sono state presentate e analizzate nel dettaglio al capitolo precedente. Dall'esito di questa valutazione, la misura proposta viene pertanto declinata seguendo la cronologia formale in tre fasi sequenziali stabilita dalle linee guida dell'OECD.

5.1 Analisi multicriterio e rating delle leve regolatorie per la *sandbox* nazionale

La rapida evoluzione tecnologica dei SAF genera un elevato grado di incertezza strategica e di mercato che rende estremamente complessa la formulazione di previsioni macroeconomiche affidabili. In questo contesto, l'approccio sperimentale basato sull'istituzione di *regulatory sandboxes* si configura come la soluzione regolatoria promettente per ridurre tale incertezza, consentendo di sperimentare nuove tecnologie e modelli di business in un ambiente controllato, protetto e su scala ridotta. Al fine di individuare la leva più idonea da testare oggi nel contesto aeroportuale nazionale, si rende necessaria l'applicazione di un modello di valutazione multicriterio che metta a confronto i quattro principali strumenti presentati nell'analisi svolta attraverso la presente tesi, ovvero i Contratti per Differenza, il sistema di Book & Claim, le tariffe differenziate e la prioritizzazione ecologica degli slot.

Questa analisi si articola attorno a cinque driver che ponderano ciascuna delle suddette misure in ragione di: sostenibilità economica, efficacia di riduzione del divario di prezzo, inclusività sulla rete nazionale, rapidità di implementazione e tutela della concorrenza.

1) **L'impatto economico-finanziario e il contenimento della spesa pubblica**
   La sostenibilità per il bilancio dello Stato rappresenta uno dei criteri più stringenti di selezione delle politiche di supporto. Sulla base di questa discriminante, è possibile distinguere le misure tra quelle a carico della fiscalità generale e strumenti fondati sull'autonomia finanziaria del sistema aeroportuale. Sotto questo profilo, i Contratti per Differenza (CfD), pur garantendo una stabilizzazione dei rendimenti per i produttori di SAF, imporrebbero allo Stato una copertura del differenziale di costo estremamente onerosa, stimata nel quinquennio 2025-2030 dallo studio del Politecnico di Torino in una forbice compresa tra i 128,11 milioni di euro nello scenario di prezzo più favorevole e ben 1.311 milioni di euro nello scenario peggiore per soddisfare gli obiettivi di miscelazione fisica nazionale [10]. Al contrario, le leve operative non tariffarie come la prioritizzazione delle bande orarie (slot ecologici) garantiscono un impatto nullo sulle finanze pubbliche, non richiedendo alcun trasferimento o reperimento di risorse statali. Le tariffe differenziate d'accesso all'infrastruttura d'aeroporto si collocano anch'esse in una posizione di elevata efficienza finanziaria, poiché sono governate dal vincolo di neutralità economico-finanziaria sancito dall'Atto di regolazione di ART (Delibera n. 38/2023) [76]. Il Book & Claim si attesta invece a un

livello intermedio-alto, in quanto comporta costi pubblici limitati principalmente all'allestimento dei registri di tracciamento e ai controlli di conformità del sistema.

2) **L'efficacia nella mitigazione del "*green premium*"**

Le misure incentivanti vanno giudicate in particolar modo per la capacità di abbattere la principale barriera d'ingresso all'adozione dei carburanti alternativi, rappresentata dal divario di prezzo rispetto al cherosene tradizionale. I SAF ad oggi, infatti, risultando da tre a sei volte più costosi del combustibile fossile [10] .Tra gli strumenti analizzati, i Contratti per Differenza (CfD) ottengono il punteggio massimo, in quanto sono progettati specificamente per compensare in modo dinamico tale divario per l'intera durata del contratto. Anche lo schema del Book & Claim ottiene un punteggio elevato poiché, consentendo l'acquisto virtuale di qualsiasi volume di SAF, permette alle compagnie di ottimizzare la catena logistica e ridurre il costo complessivo di transizione. Altri incentivi invece, come le tariffe differenziate, presentano un'efficacia estremamente limitata e marginale poiché la riduzione dei corrispettivi aereoportuali è in grado di coprire solo una frazione trascurabile dell'ingente extra-costo del combustibile sostenibile. Analogamente, è stato assegnato un punteggio basso alla soluzione che propone la priorità d'accesso alle bande orarie in quanto agisce come un incentivo di natura prettamente operativa ma non contribuisce ad una riduzione diretta del costo del carburante in fattura.

3) **L'inclusività geografica nazionale**

Un rischio intrinseco alle politiche di decarbonizzazione fisica del settore aereo è la polarizzazione logistica e la conseguente marginalizzazione degli scali di piccole dimensioni, i quali spesso sono distanti dai siti di produzione dei SAF o non dispongono delle risorse finanziarie sufficienti per adattare nell'immediato le loro infrastrutture ai nuovi combustibili. Sotto questo criterio, l'integrazione di sconti tariffari o di clausole per dare priorità di assegnazione degli slot ai vettori che usano SAF, rischia di amplificare il divario ecologico e competitivo con i grandi hub. Il sistema di Book & Claim rappresenta quindi la risposta ottimale a questa vulnerabilità del sistema, superando integralmente i limiti di prossimità geografica e infrastrutturale dello scalo periferico. Anche i Contratti per Differenza (CfD) ottengono un punteggio elevato ma non massimo, in quanto rimangono legati alla produzione fisica e alla fornitura di carburante nonché ad una base commerciale limitata.

4) **La complessità regolatoria e amministrativa nell'iter di attivazione**

La fattibilità di una sperimentazione è fortemente condizionata dai tempi d'avvio amministrativi e dalla complessità della *governance* di monitoraggio e controllo necessaria alla prevenzione di potenziali rischi operativi. Il sistema Book & Claim, pur teoricamente ideale, presenta in sede di *sandbox* una complessità procedurale ad oggi enorme, legata alla necessità di istituire registri di contabilità centralizzati, standard rigorosi di tracciabilità della catena di custodia e stringenti controlli antifrode per escludere in modo assoluto il rischio di doppio conteggio dei benefici ambientali. Al contrario, l'attivazione di una *sandbox* focalizzata sugli slot ecologici risulta concretamente realizzabile nel breve termine. Infatti, la Circolare ENAC EAL-18 e lo standard globale IATA WASG Edizione 4 offrono già una cornice procedurale predefinita che consente al Comitato di Coordinamento dello scalo di proporre una modifica del sistema delle bande orarie, rendendo la sperimentazione immediatamente attuabile, previa il nulla osta del Dirigente della

Direzione Aeroportuale locale dell'ENAC. Alla sub-articolazione tariffaria non è stato assegnato il punteggio massimo per l'iter amministrativo più articolato, vincolato a tempistiche procedurali rigide e non comprimibili stabilite dall'ART e dalla Direttiva europea. I Contratti per Differenza hanno invece ottenuto una valutazione contenuta a causa delle tempistiche prolungate necessarie per strutturare le gare d'asta e del vincolo di notifica preventiva alla Commissione Europea [82].

5) **La gestione del rischio concorrenziale, antitrust e di *hub shifting***

L'ultimo criterio valuta la capacità di prevenire distorsioni della concorrenza sul mercato aereo e l'insorgenza del fenomeno dell'*hub shifting* [10], in base al quale l'imposizione unilaterale di costi e vincoli ecologici in uno scalo spinge i vettori di lungo raggio a deviare il proprio traffico verso hub extra-europei non soggetti alle medesime restrizioni ambientali, determinando un grave danno competitivo per il sistema dell'Unione [10]. Lo strumento della *regulatory sandbox* consente di mitigare preventivamente questi fenomeni grazie alla natura temporanea, flessibile e delimitata del test, come raccomandato dall'OECD *Sandbox Toolkit*. Nel confronto tra i diversi strumenti, i Contratti per Differenza hanno ottenuto il punteggio migliore, grazie all'impiego di procedure d'asta aperte e non discriminatorie a garanzia della parità di trattamento tra i vettori. Inoltre, compensando il *green premium* alla fonte per tutti i partecipanti, i CfD eliminano alla radice l'incentivo economico a delocalizzare le rotte per risparmiare sul costo del carburante. Tuttavia, poiché la strutturazione di aste dedicate intra-settoriali richiede comunque una complessa vigilanza statale per evitare asimmetrie informative o concentrazioni oligopolistiche tra i grandi produttori industriali di SAF, si è deciso di non attribuire la votazione massima. Pur rimuovendo la discriminazione fisica tra scali, permettendo anche ai piccoli aeroporti di partecipare, il sistema di *Book & Claim* è stato penalizzato nella votazione. Se non governato da un registro internazionale coordinato, rischia infatti di favorire comportamenti opportunistici e di concentrare la produzione solo nelle aree geograficamente più convenienti [73], penalizzando e delocalizzando lo sviluppo della filiera nazionale [10]. Infine, i punteggi più bassi in termini di tutela concorrenziale sono stati assegnati alle leve aeroportuali (tariffe e slot) dopo aver valutato che l'applicazione unilaterale di tali misure da parte di singoli scali genera forti asimmetrie competitive, esponendo il sistema nazionale al rischio di frammentazione regolatoria.

Il livello di idoneità alla sperimentazione in *sandbox* è stato quantificato mediante l'utilizzo di una scala ordinale crescente da 1 a 5. Per favorire l'attivazione di un test pilota tempestivo, privo di oneri di bilancio e a basso rischio di contenzioso normativo, i criteri di valutazione sono stati successivamente ponderati sulla base delle seguenti assunzioni:

→ **C1 = Impatto sulla finanza pubblica, (peso: 30%)**: lo Stato non dispone di coperture finanziarie immediate a livello locale per poter finanziare il progetto.

→ **C2 = Fattibilità e rapidità di implementazione, (peso: 30%)**: verranno sfruttati canali regolatori nazionali già esistenti.

→ **C3 = Gestione dei rischi concorrenziali, (peso: 20%)**: si vuole azzerare il rischio di contenzioso antitrust che potrebbero anticipare la chiusura della sperimentazione.

→ **C4 = Abbattimento diretto del "green premium", (peso: 10%)**: trattandosi di un test su scala ridotta, l'intensità del segnale di prezzo ha priorità secondaria rispetto alla verifica della reattività dei vettori all'incentivo.

→ **C5 = Inclusività territoriale della rete, (peso: 10%)**: la parziale esclusione temporanea degli scali minori è accettabile per circoscrivere l'esperimento.

Nell'immagine che segue i risultati dell'analisi multicriterio e media pesata:

Strumento regolatorio	Oneri finanza pubblica (Costo nullo = 5)	Mitigazione "green premium" (Alta copertura = 5)	Inclusività territoriale (No Green divide = 5)	Fattibilità & time-to-market (Bassa complessità = 5)	Rischi concorrenziali (Basso rischio = 5)	Media pesata (Punteggio)	Ranking (Classifica)
PESO CRITERIO (%)	30%	10%	10%	30%	20%	100%	-
Contratti per Differenza (CfD)	1	5	4	2	4	2.60	4
Book & Claim	4	3	5	1	3	2.90	3
Tariffe Differenziate	4	2	1	4	2	3.10	2
Prioritizzazione slot ecologici	5	2	1	5	2	3.70	1
Media semplice (non pesata)	*3.5*	*3.0*	*2.8*	*3.0*	*2.8*	*3.08*	

Legenda punteggi di idoneità:	
1	1 = Fortemente Sfavorevole / slta complessità o costo
2	2 = Sfavorevole / criticità rilevanti
3	3 = Medio / neutro
4	4 = Favorevole / buona idoneità
5	5 = Ottimale / massima idoneità e beneficio

Figura 5.1- Matrice di rating per la selezione dello strumento ottimale per la sandbox regolatoria.

Dall'analisi multicriterio sintetizzata nella matrice di valutazione riportata in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** emerge con una media pesata di 3.70, come l'intersezione dei parametri selezionati individui nella prioritizzazione operativa delle bande orarie (*slot* ecologici) la leva strategica ottimale da testare nell'immediato all'interno dello spazio protetto di una *regulatory sandbox* nazionale.

Tuttavia, l'implementazione pratica di questa misura deve confrontarsi con un vincolo significativo: qualora l'accesso all'incentivo operativo fosse subordinato all'immissione fisica del carburante sostenibile a bordo dell'aereo prima del decollo, lo strumento risulterebbe impraticabile per la quasi totalità dei vettori a causa della frammentazione della filiera e delle difficoltà logistiche che la fornitura di SAF comporta. Per superare questa barriera e scongiurare asimmetrie competitive, si propone un disegno sperimentale ibrido in cui la prioritizzazione operativa degli *slot* viene integrata con la flessibilità virtuale del sistema di Book & Claim, ammettendo la convalida di certificati digitali di acquisto (*SAFc*).

Al fine di contenere i tempi d'avvio amministrativi, in mancanza di un registro informatico centralizzato a livello europeo, il coordinatore della sandbox (Assoclearance, operando sotto la vigilanza di ENAC) istituirà un sistema di contabilità regolatoria semplificata, circoscritto ai soli vettori e tratte partecipanti al progetto pilota. Sotto il profilo procedurale, le compagnie aeree che intendono beneficiare della priorità dello slot dovranno esibire certificati SAFc già emessi e validati da schemi di certificazione accreditati e conformi agli standard internazionali. Il ruolo di Assoclearance si focalizzerà sulla vigilanza contabile, verificando l'esatta corrispondenza tra il certificato esibito e il codice identificativo del volo (*flight ID*)

nei registri dello scalo. Il flusso operativo prevede che, una volta validata la transazione virtuale sulla piattaforma semplificata di *Book & Claim* e associato univocamente il certificato digitale alla tratta interessata, il coordinatore proceda all'assegnazione dello slot per la stagione di riferimento. Riconoscendo formalmente l'impiego del SAF su quel collegamento, la richiesta del vettore sostenibile otterrà una priorità di allocazione rispetto alle richieste concorrenti per la medesima banda oraria presentate da vettori con aeromobili alimentati tramite cherosene convenzionale.

Per garantire la piena conformità con i principi di concorrenza, l'assegnazione prioritaria non andrà a intaccare i diritti storici acquisiti degli altri vettori, ma attingerà esclusivamente a una quota circoscritta del *pool* comune degli slot assegnabili (contenuta entro un limite massimo stimato della capacità del pool). Inoltre, per mitigare i rischi di asincronia internazionale di rete e l'esposizione a contenziosi, la sperimentazione pilota sarà inizialmente limitata alle tratte domestiche nazionali (come la rotta Roma-Milano), dove l'intero tragitto e gli scali di partenza e arrivo ricadono sotto la comune giurisdizione regolatoria e operativa di ENAC, ENAV e Assoclearance.

Questo modello regolatorio misto consente di valutare sul campo l'efficacia reale di un incentivo che stimola la domanda e l'offerta di combustibili sostenibili, senza dover attendere la complessa maturazione della logistica fisica dei biocarburanti o di un mercato globale dei certificati virtuali. Al contempo, la *sandbox* offrirà alle autorità nazionali un prezioso banco di prova per studiare e perfezionare le procedure di prevenzione antifrode, i canali informativi tra gli attori della rete e le clausole ambientali su un campione controllato di traffico, definendo un prototipo di *governance* istituzionale sicuro e replicabile per la futura integrazione nei meccanismi di rete dell'Unione Europea.

5.1.1 Analisi di sensitività del modello multicriterio per le leve della *sandbox*

Al fine di testare la robustezza della soluzione individuata nell'analisi precedente, in cui l'assegnazione di pesi non polarizzati (30% per l'impatto sulla finanza pubblica, 30% per la rapidità di implementazione, 20% per la tutela della concorrenza, 10% per l'efficacia sul green premium e 10% per l'inclusività territoriale) ha individuato nella prioritizzazione delle bande orarie (*green slot*) la soluzione più adatta da sperimentare su piccola scala, si rende necessario lo sviluppo di un'analisi di sensitività del modello MCDA (Multi-Criteria Decision Analysis).

Tale indagine metodologica intende valutare se e come variano le graduatorie delle quattro leve d'intervento (Contratti per Differenza, Book & Claim, tariffe aeroportuali differenziate e prioritizzazione degli slot) all'estremizzazione delle priorità strategiche dell'autorità di regolazione nazionale. Nello specifico, il modello decisionale è stato sottoposto ad uno stress-test simulando quattro scenari decisionali alternativi estremi, all'interno dei quali viene attribuito un peso dominante del 50% a uno specifico criterio di valutazione, distribuendo il restante 50% tra gli altri quattro criteri residui (con un peso è pari al 12,5% ciascuno).

In Tabella 19 è stata riportata una schematizzazione degli scenari appena presentati:

Scenario	Descrizione
Fiscalità rigida Focus sul contenimento dell'impatto sulle finanze pubbliche (C1 al 50%)	Viene simulato uno stato di estrema tensione dei conti pubblici che limita il finanziamento di politiche di incentivazione diretta dei SAF da parte dell'autorità governativa
Urgenza Sandbox Focus sulla rapidità di implementazione (C2 al 50%)	Viene valorizzata l'immediata cantierabilità del progetto pilota, premiando le leve che si poggiano su iter procedurali ed amministrativi già utilizzabili nel breve termine
Massima efficacia Focus sulla riduzione del green premium (C4 al 50%)	Si ipotizza un contesto politico fortemente orientato all'abbattimento immediato del differenziale di costo dei SAF rispetto al cherosene fossile, con l'obiettivo di massimizzare i volumi imbarcati a qualunque costo finanziario o amministrativo
Inclusività territoriale Focus sull'abbattimento delle discriminazioni tra aeroporti di grandi e piccole dimensioni (C5 al 50%)	Il decisore pubblico per prevenire il rischio di polarizzazione tra gli scali maggiori e i piccoli aeroporti regionali privilegia strumenti flessibili sul piano logistico e geografico

Tabella 19- Tabella riassuntiva degli scenari per l'analisi di sensibilità del modello MCDA.

Realizzando tabelle distinte per ogni scenario e corrispondenti alla modifica di ponderazione delle specifiche variabili chiave, è stata elaborata la Tabella 20 che raccoglie tutti i risultati ottenuti seguendo la procedura illustrata in Figura 5.1.

Strumento regolatorio	Scenario base (equilibrato)	Fiscalità rigida (C1=50%)	Urgenza sandbox (C2=50%)	Massima efficacia (C4=50%)	Inclusività territoriale (C5=50%)
Contratti per Differenza (CfD)	2.60	2.38	2.75	3.88	3.50
Book & Claim	2.90	3.50	2.38	3.13	3.88
Tariffe Differenziate	3.10	3.13	3.13	2.38	2.00
Prioritizzazione slot ecologici	3.70	3.75	3.75	2.63	2.25

Tabella 20- Punteggi ponderati complessivi per scenario di sensitività.

L'istogramma di cui alla Figura 5.2 illustra in maniera comparativa i risultati di tale analisi:

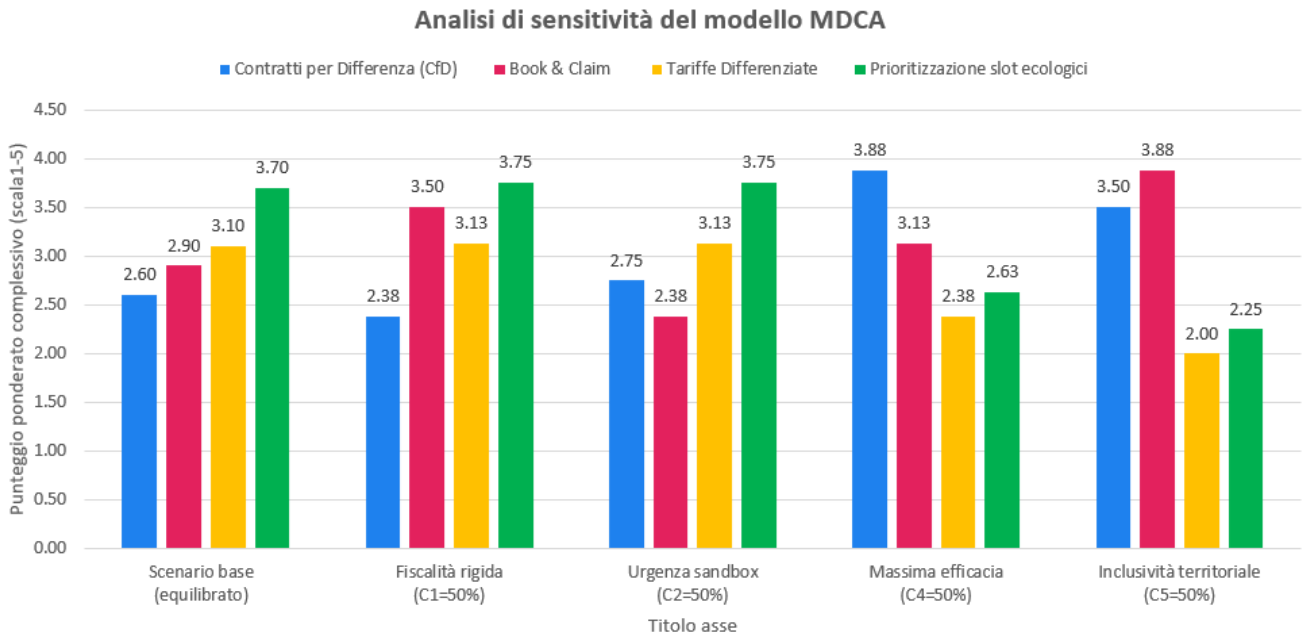


Figura 5.2- Risultati della sensitività del modello MDCA.

Dall'andamento del grafico di sopra emerge che l'assegnazione temporanea di priorità nell'allocazione degli slot aeroportuali conquista il primo posto assoluto nello "Scenario base" (con un punteggio di 3,70) in condizioni di limiti di intervento pubblico (con un punteggio di 3,75 nello scenario di "Fiscalità Rigida") e quando si privilegia l'urgenza di avviare il progetto (con un punteggio di 3,75 nello scenario di "Urgenza sandbox"). Il fatto che tale soluzione primeggi in 3 scenari su 5 evidenzia la robustezza della scelta operata in precedenza nonostante la stessa si collochi al terzo posto negli scenari di "Massima efficacia" e "Inclusività territoriale" rispetto ai Contratti per Differenza (CfD) e al sistema virtuale Book & Claim. Questo comportamento è in realtà estremamente realistico in quanto riflette l'evidenza che un incentivo operativo non monetario non può competere direttamente con strumenti finanziari pensati per mitigare l'extra-costo del combustibile ma anche la realtà logistica del trasporto aereo per cui le regole degli slot sono applicabili solo nei grandi scali che possono essere raggiunti dalla catena di fornitura dei SAF, escludendo gli scali regionali più isolati e limitando l'applicazione omogenea dello strumento sul territorio nazionale.

In conclusione, l'analisi di sensitività convalida la scelta di adottare la prioritizzazione degli slot come leva da sviluppare all'interno di una *sandbox* regolatoria nazionale e dimostra che, sotto vincoli reali di spesa e di tempo che condizionano le scelte delle autorità pubbliche, tale misura garantisce il miglior compromesso complessivo per la transizione ecologica del settore aereo.

5.2 Realizzazione della sandbox

Al fine di garantire il massimo rigore scientifico e l'allineamento con le pratiche internazionali di regolazione, l'intera architettura della sandbox viene strutturata seguendo fedelmente il *Regulatory Sandbox Toolkit (2025)* e il relativo Annex C (*Regulatory Sandbox Workbook)* elaborati dall'OECD.

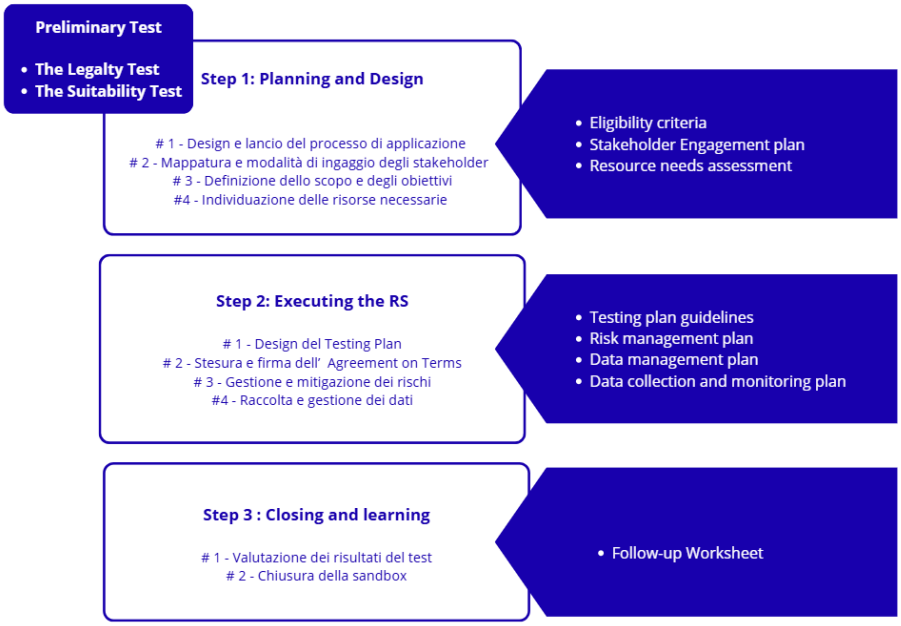


Figura 5.3- Schematizzazione degli step di costruzione di una sandbox seguendo il manuale dell'OECD.

Il *toolkit* dell'OECD suddivide il ciclo di vita di una sandbox regolatoria in tre macrofasi sequenziali (vedi Figura 5.3) già presentate nel capitolo 2. Ciascuna di queste, prevede la compilazione di specifici *template* e documenti di lavoro contenuti nel *Workbook* dell'Annex C, progettati per guidare l'autorità di regolazione dall'idea iniziale fino ad una potenziale riforma legislativa permanente.

La prima fase si apre con l'esecuzione dei test diagnostici preliminari (il *Legality Test* e *Suitability Test*). Successivamente, si procede determinando i requisiti di ammissibilità dei potenziali candidati (*eligibility criteria*) che opereranno all'interno dell'ambiente sperimentale. A questo passaggio segue la fase di design del prototipo durante la quale vengono mappati gli stakeholder, pianificandone il coinvolgimento durante i test (*Stakeholder Engagement Plan*), e viene poi valutata la sostenibilità finanziaria, umana e tecnologica del regolatore (*Resource Assessment*) per gestire la sperimentazione. Al termine dello Step 1, il regolatore promuove tramite canali riconosciuti (come, ad esempio, il suo portale ufficiale) le linee guida del programma e il bando pubblico di partecipazione per invitare le imprese a candidarsi entro la scadenza. Una volta selezionati i candidati, il regolatore definisce con ciascuno di essi un "*Testing Plan*" e firma un accordo legale di concessione della deroga temporanea e di allocazione delle responsabilità civili tra i partecipanti ("*Agreement on Terms*). L'esecuzione sul campo richiede l'attivazione di un "*Data Management Plan*" per raccogliere, validare e proteggere i flussi di dati generati dai test, e l'applicazione rigorosa di una matrice dei rischi e delle misure di mitigazione per proteggere la concorrenza, la sicurezza aerea e gli utenti finali dagli effetti negativi generati. Alla scadenza del termine di sperimentazione, un valutatore (interno o terzo indipendente) analizza i dati raccolti e redige l'"*Evaluation Report*", confrontando le performance dell'esperimento con i KPI stabiliti all'interno del *testing plan*. Sulla base

di questi risultati, l'autorità sceglie l'"*Exit Option*" più appropriata (dal divieto alla riforma permanente delle leggi esistenti) e il *top management* dell'agenzia compila il "*Follow-up Worksheet*", affiancato dall'*RS team*, rispondendo in modo strutturato ed esecutivo alle raccomandazioni e alle conclusioni contenute nell'*Evaluation Report*.

Esistono tuttavia specifici passaggi che non possono essere simulati e completati in modo unilaterale. Questi blocchi rappresentano infatti i "confini" del lavoro accademico e richiedono, in un contesto reale, la coprogettazione tecnica e legale tra il regolatore e gli altri stakeholder coinvolti nella sandbox. Ad esempio, la progettazione di dettaglio del flusso di dati (*Data management plan*) è uno dei punti più critici del monitoraggio in quanto richiederebbe un tavolo tecnico specializzato per definire aspetti legati alle modalità di raccolta e di utilizzo dei dati, alle policy di sicurezza informatica e alla definizione delle responsabilità legali in caso di errore di trasmissione dei dati o malfunzionamento dei software di raccolta dei dati. Anche il documento di "*Agreement on Terms"*, data la natura di accordo bilaterale, non può essere standardizzato in quanto risultato di un negoziato legale diretto e pertanto se ne rimanda la stesura definitiva alla contrattazione reale tra i rappresentanti legali dello Stato e dei vettori aerei.

Per queste ragioni, la trattazione si arresta prima dello "*Step 3 (Closing and Learning)*" in quanto l'elaborazione dei documenti di chiusura citati poco prima, richiede necessariamente l'analisi di dati empirici reali raccolti sul campo alla scadenza dell'intervallo concesso per i test, oltre a valutazioni politico-istituzionali e processi decisionali che appartengono alla sfera esclusiva del Regolatore e del suo Comitato. Svolgendosi in ambito accademico, il processo di compilazione dell'Annex C dell'OECD viene simulato effettuando ipotesi razionali, fondate sulla letteratura scientifica e sui dati di mercato. L'elaborazione di questa documentazione va dunque intesa come una proposta preliminare e un'ipotesi di lavoro che non riveste il carattere di un manuale operativo esaustivo e, data l'elevata complessità tecnica della materia, presenta intrinseci margini di perfezionamento. L'intero impianto rimane pertanto strutturalmente aperto a ricalibrazioni e correzioni che si renderebbero necessarie in seguito a pareri tecnici, valutazioni legali o indicazioni operative fornite dagli esperti di settore durante una reale fase di consultazione pubblica.

5.3 Test diagnostici preliminari: Legality Test e Suitability Test

Le linee guida metodologiche dell'*OECD Regulatory Sandbox Toolkit* impongono l'esecuzione di due verifiche diagnostiche preliminari che precedono la fase di design dello strumento regolatorio. Tali test servono a validare ex-ante la fattibilità giuridica della sperimentazione e a dimostrare l'effettiva idoneità dello strumento rispetto ad altre opzioni di regolazione tradizionali.

5.3.1 Legality Test

Nella sezione *Annex C.,* Il *Regulatory Sandbox Workbook del Toolkit* suggerisce l'esecuzione di un primo test che permette di identificare le barriere normative del sistema attuale (*AS-IS*) che ostacolano l'adozione dell'innovazione, definendo successivamente le azioni amministrative necessarie per raggiungere lo stato desiderato (*TO-BE*). In Tabella 21 è stato riportato un esempio di svolgimento della prova sulla base della proposta di sandbox che si è deciso di sviluppare in seguito ai risultati dell'analisi multicriterio nel capitolo 5.1.

Test di legalità		**Questo test è usato per determinare se una RS è uno strumento appropriato per superare challange di regolamentazione**	
Diagnostica della Regolamentazione			
Baseline- situazione AS IS		**Stato desiderato- situazione TO BE**	
Punti di forza- cosa è attualmente concesso dalla legislazione?	Vincoli- cosa non è attualmente concesso dalla legislazione?	Opportunità- cosa deve essere cambiato?	Azioni- come cambiarlo?
Il Regolamento (CEE) n. 95/93 e successivi aggiornamenti consentono la proposta e l'adozione di modifiche alle modalità di assegnazione degli slot. L'articolo 5 della delibera stabilisce che il comitato di coordinamento può proporre linee direttrici locali per l'assegnazione delle bande orarie, tenendo conto di criteri ambientali (art. 5, lettera a, art. 8, paragrafo 5).	Il Regolamento (CEE) n. 95/93 impone un rigido schema di assegnazione degli slot aereoportuali e tutela il diritto storico dei vettori aerei. Ad oggi non è ancora stato riconosciuto un registro nazionale o europeo centralizzato a supporto dello schema di *Book & Claim.*	Deve essere valutata la possibilità di emettere una *sandbox* con il coinvolgimento del Ministero dei trasporti (MIT) che permetta di testare gli effetti dell'introduzione di un sistema di prioritizzazione degli slot aereoportuali per i vettori che dimostrano di aver usato SAF per la specifica tratta, anche mediante esibizione di certificati digitali di acquisto (SAFc)	Tramite la sottoscrizione di un protocollo di intesa multilaterale tra MIT, ENAC, Assoclearance ed ENAV per ratificare l'avvio della *sandbox* e definire lo scudo giuridico.

Tabella 21- Preliminary Legality Test.

5.3.2 Suitability Test

Il "*Suitability Test*", replicato e riportato in Tabella 22, analizza invece le ragioni per cui il modello protetto della sandbox rappresenta l'approccio regolatorio più efficace per superare lo stallo del mercato, misurando i benefici attesi rispetto a strumenti alternativi.

Test di idoneità		Questo test è usato per determinare se una RS è uno strumento appropriato per superare challange di regolamentazione	
Diagnostica della Regolamentazione			
Sfida regolatoria		**Stato desiderato- situazione TO BE**	
Qual è la sfida?	Perché è una sfida?	Quali sono i benefici di affrontarlo?	Come affrontarlo con una regulatory sandbox? Ci sono alternative?
Oggi il settore aereo contribuisce per circa il 3% delle emissioni globali di gas a effetto serra. Per poterle abbattere, le principali autorità ed istituzioni riconoscono i Sustainable Aviation Fuels (SAF) come la soluzione più efficiente. La sfida risiede nell'introdurre nel quadro regolatorio uno strumento di incentivo efficace per la diffusione e l'accelerazione di questi carburanti sostenibili sul mercato.	Il Regolamento ReFuelEU Aviation impone quote minime di miscelazione fisica crescenti e inderogabili, la cui violazione esporrebbe lo stato italiano e i singoli operatori a severe sanzioni pecuniarie. Tuttavia, in assenza di meccanismi compensativi, i vettori aerei non dispongono di alcun incentivo economico interno per farsi carico dell'ingente extra-costo dei SAF, a cui si sommano le difficoltà logistiche della filiera che rendono la fornitura fisica impraticabile per la quasi totalità degli scali della rete nazionale.	Poiché l'attuale quadro normativo di assegnazione delle bande orarie tutela rigidamente i diritti storici dei vettori in base al solo criterio storico di utilizzo degli slot, prescindendo completamente dall'impatto ambientale della flotta, si rende necessaria una parziale deroga o integrazione dello schema regolatorio ordinario. Tale modifica temporanea deve introdurre parametri di sostenibilità ecologica come criteri prioritari per l'accesso agli slot di scalo, offrendo così una leva non monetaria in grado di incentivare i vettori a sostenere l'ingente extra-costo dei biocarburanti	Per modificare l'attuale schema di assegnazione degli slot, il Comitato di Coordinamento dovrà elaborare una proposta da sottoporre all'ENAC. Successivamente in caso di valutazione positiva, la Direzione Aeroportuale sarà tenuta a rilasciare il formale nulla osta amministrativo per rendere esecutivi i nuovi criteri prima delle Conferenze degli Orari IATA. Dovrà essere inoltre prevista l'istituzione di un sistema di contabilità semplificato per il tracciamento dei certificati digitali di acquisto dei SAF, circoscritto ai soli vettori e tratte partecipanti al progetto pilota. Altre soluzioni alternative di supporto alla diffusione dei SAF sul mercato prevedono finanziamenti diretti erogati dallo stato come i contratti per differenza

Tabella 22- Preliminary Suitability Test.

5.4 Step 1: pianificazione e design della sandbox

Seguendo fedelmente la compilazione metodologica e sequenziale della documentazione suggerita dall'*OECD* (2025), si prosegue con la macro-fase di pianificazione e costruzione della sandbox di cui è stata riportata la tabella riassuntiva in Figura 5.4. Questo step iniziale permette di definire il perimetro dell'esperimento, gli stakeholders coinvolti, gli obiettivi che si vogliono raggiugere e le risorse necessarie

per attuare il modello ibrido (*slot* ecologici e contabilità *Book & Claim* semplificata) come anticipato all'inizio del capitolo.

	The RS Blueprint: *Enter Project Name Here*	This section provides a detailed roadmap for setting up and executing the regulatory sandbox, including steps for design, stakeholder engagement, risk management, resource allocation, and monitoring progress to ensure the sandbox achieves its intended goals.		
	STEP 1: Planning and Design			
Stage	**1.1 Design and launch the application process**	***1.2 Map out and engage the RS stakeholders***	**1.3 Define aims and objectives**	**1.4 Determine the needed resources**
Consider	*What are the criteria applicants must meet to participate in the RS? Is your application process, including the testing plan instructions, well-structured and easy to understand? Is your onboarding process efficient?*	*Who are the key stakeholders? What are their key needs and constraints?*	*What is your key objective? What are you aiming to achieve??*	*What resources do you need to run the RS effectively?*
Action points	**#1 Create a structured application process** that is easy to understand and complete. This should include application forms, guidelines, and submission deadlines. **#2 Establish criteria** that applicants must meet to participate in the sandbox, such as industry focus, innovation type, and regulatory relevance. **#3 Require applicants to submit a detailed testing plan as part of their application**. The plan should outline their objectives, methodologies, success criteria, and how they will collect and manage data. **#4 Launch the application process** and promote it through relevant channels to attract qualified participants. **#5 Set up a review process to evaluate the applications** based on the eligibility criteria and the quality of the submitted testing plans. Example: For a fintech regulatory sandbox, eligibility criteria might include being a registered financial service provider, having a viable digital payment solution and demonstrating the potential for regulatory impact. Develop an online application portal where applicants can fill out their details, upload necessary documents, and submit their applications. A testing plan could include a pilot program with a specified number of users, metrics for assessing loan processing speed and accuracy, and strategies for data security.	**#1 Identify and map key stakeholders.** Identify key stakeholders, and clearly define their roles and responsibilities. **#2 Address key stakeholder needs**. Document specific unmet needs: clearly outline the business, regulatory, and policy gaps that your regulatory sandbox (RS) is designed to address. Pinpoint and analyse key areas of regulatory uncertainty: determine the areas where current regulations are unclear, and develop strategies within the RS to explore and clarify these uncertainties. Define and target desired benefits: specify the benefits you intend to achieve through the RS for industry players, innovators, regulators, consumers, and society as a whole. **#3 Consult and engage key stakeholders**: develop a plan to actively involve and gather input from all relevant stakeholders, ensuring their contributions shape and support the RS.	**#1 Clearly define the primary goal or purpose of your sandbox initiative**. Articulate the main outcome you want to accomplish through the sandbox, whether it's testing a new technology, refining regulatory frameworks, or driving innovation in a specific sector. Example: The key objective of the sandbox might be to evaluate the viability and safety of using AI-driven algorithms for automated loan approvals in the financial sector. The aim is to gather data on how these algorithms perform under various conditions, assess their impact on decision-making accuracy and fairness, and ultimately inform new regulations that balance innovation with consumer protection.	**#1 Assess the resources—time, people, and funding**. Time: Running a sandbox takes time, but it yields higher quality evidence. Consider if you need quick answers or if thorough, slower results are more valuable. People: Evaluate if your team has the capacity and skills needed or if you'll need additional staff to manage and analyse the sandbox. Funding: Determine your budget constraints and weigh the costs of experimenting versus the risks of not gaining critical insights through a sandbox.
Inspiration	To establish the eligibility criteria for your RS and appraise applications, see **Instruction 1 – Application and Participant Selection Process (Step 1)**	For detailed instructions on stakeholder identification and engagement, see **Instruction 2 – Mapping and Consulting Stakeholders**	See **Box 1.1** of this Toolkit for more information on defining aims and objectives	For detailed instructions on how to determine resources and create a needs assessment,, see **Instruction 3 –| Resources Assessment**.

Figura 5.4- Step 1: planning e design.

Fonte: OECD (2025).

5.4.1 Selezione dei partecipanti

In conformità alle raccomandazioni dell'*OECD*, prima dell'attivazione della sperimentazione, l'autorità regolatoria deve impostare una procedura di ammissione dei candidati articolata su specifici criteri di ammissibilità, volti a guidarlo nella selezione dei progetti e delle aziende più adatti che parteciperanno all'ambiente sperimentale.

Adattando lo schema concettuale in Figura 2.7, introdotto nel capitolo 2, al perimetro operativo della *sandbox* pilota del seguente trattato di tesi, è stata realizzata la Tabella 23. La matrice classifica, da un lato, i fattori premiali che incentivano l'ammissione del candidato e, dall'altro, i requisiti critici o le condizioni che ne compromettono l'idoneità, fungendo da filtro d'accesso per le autorità coordinatrici del progetto.

Indicatori positivi nelle domande di applicazione	Indicatori negativi nelle domande di applicazione
Innovazione	
Il candidato propone un modello integrato che unisce l'acquisto virtuale di certificati *SAFc* a una riprogrammazione degli slot aereoportuali sulla base di criteri di emissione ambientale	Il candidato propone solo l'acquisto standard di biocarburanti tradizionali (HEFA), senza alcuna innovazione nel tracciamento digitale
Utilizzo di SAF ed e-fuels	Estraneità all'uso di carburanti diversi da quello fossile
Necessità di una deroga normativa	
Dimostrazione analitica che, in assenza incentivi regolatori, l'acquisto di SAF è logisticamente infattibile o economicamente preclusivo	Il candidato dispone già di catene logistiche di rifornimento fisico di SAF stabili e pienamente efficienti
Dimostrazione che lo *slot* prioritario è una leva d'accesso promettente per giustificare l'acquisto fisico e virtuale di SAF	Il candidato beneficia già di diritti di priorità sugli slot a lui assegnati negli aeroporti in cui opera
Prontezza tecnologica	
Il candidato ha contratti attivi con fornitori di SAF in grado di emettere certificati *SAFc* validati da standard riconosciuti	Il candidato propone l'uso di biocarburanti privi di certificazione accreditata
Il candidato ha sviluppato sistemi informativi pronti a interfacciarsi con il registro di gestione di Assoclearance	Il candidato si affida a sistemi software di tracciamento dei SAFc interni non compatibili con il registro di gestione di Assoclearance
Potenzialità commerciale	
Il candidato dispone di un sistema di tracciamento delle operazioni di business replicabile da altri business	Il candidato dispone di un sistema di tracciamento delle operazioni di business non replicabile da altri business
Il candidato presenta un business plan robusto e promettente	Il candidato presenta un business plan debole
Il candidato dimostra di avere un'intensa attività sul territorio nazionale	Il candidato dimostra di avere una limitata attività sul territorio nazionale
Potenzialità sociali	
Il piano proposto dal candidato garantisce un risparmio certificato di CO_2 derivato dalla sua implementazione e prevede la cancellazione dal registro del certificato SAFc per evitare fenomeni di *double-counting*	Il piano proposto dal candidato non prevede una metodologia certificata di quantificazione del risparmio emissivo
Piano di Test e Strategia d'Uscita	
La richiesta di prioritizzazione oraria è limitata e proporzionata, rientrando rigorosamente nella riserva del pool di scalo, senza intaccare i diritti storici degli altri vettori	Il piano del candidato richiede un volume di slot prioritari che supera la riserva del pool, minacciando i diritti storici degli altri vettori
Exit strategy chiara che definisce il ripristino istantaneo della normale programmazione oraria	Exit strategy non realistica o non efficace per il ripristino istantaneo della normale programmazione oraria
Indicatori di prestazione (KPI) idonei e specifici per il progetto	Indicatori di prestazione (KPI) vaghi o non quantificabili fisicamente

Tabella 23-Criteri dei eligibilità alla sandbox proposta per il caso studio.

5.4.2 Mappatura degli stakeholders

La tabella che segue definisce la mappatura strategica e il piano di engagement dei soggetti che verranno coinvolti nella sandbox, ricalcando fedelmente la struttura tabellare formale codificata del *Regulatory Sandbox Toolkit dell'OECD* (2025).

Stakeholder	Ruolo nella RS	Metodo di ingaggio	Canale di comunicazione	Meccanismo di riscontro	Metriche di valutazione
Ministero dei trasporti	Autorità politica e di vigilanza strategica della sandbox nazionale	Meeting di gruppo di lavoro regolari sull'avanzamento della policy e partecipazione al disegno della sandbox	Aggiornamenti via email, report mensili	Tavolo tecnico interministeriale di consultazione	Numero di riforme nazionali, livello di conformità rispetto agli obblighi e alle scadenze di ReFuelEU.
ENAC	Regolatore tecnico, garante della concorrenza e direzione scientifica	Tavolo di coordinamento e vigilanza regolatoria, partecipazione al disegno della sandbox	Circolari ufficiali, portale web istituzionale e canali formali	Consultazione *ex-ante* all'avvio della sandbox e audit periodico di conformità delle operazioni e dei voli	Numero di deroghe concesse senza ricorsi legali o contenziosi antitrust
Assoclearance	Soggetto attuatore della modifica proposta, gestore contabile e coordinatore operativo dell'assegnazione degli slot verdi	Meeting di gruppo di lavoro regolari sull'avanzamento della policy e partecipazione al disegno della sandbox	Sistemi di messaggistica, portale digitale della Sandbox	Questionari tecnici e di gradimento ai vettori partecipanti	Tempo medio di validazione e sblocco dei certificati virtuali SAFc (in ore), tasso di errore o discrepanza contabile nel registro dei certificati..
ENAV	Controllo del traffico aereo e coordinamento tattico a terra, autorizzazione e pianificazione del rullaggio	Meeting di lavoro per gestire gli aspetti tecnico-operativo della sandbox	Sistemi di messaggistica e condivisione di verbali dei tavoli di coordinamento tecnico	Simulazione preventiva dei flussi di traffico a terra, comunicazioni e istruzioni tattiche in tempo reale	Minuti effettivi risparmiati dai voli prioritari sulle tratte analizzate, assenza di impatti o problematiche sulla sicurezza aeroportuale
Gestori aereoportuali	Ospitante infrastrutturale, supporto logistico e gestione dei canali di rampa	Comitato di Coordinamento dello scalo pilota	Aggiornamenti via email, report mensili	Verbali del Comitato di scalo e incontri bilaterali mensili di monitoraggio delle operazioni	Percentuale di riduzione delle emissioni Scope 3, indice di puntualità dei voli prioritari della Sandbox
Vettori aerei partecipanti	Beneficiari operativi della sperimentazione e acquirenti di SAF e/o di certificati SAFc	Co-progettazione del *Testing Plan* operativo	Comunicazioni operative giornaliere, portale digitale della Sandbox	Fornitura e condivisione dei dati di rampa e di volo, rapporti mensili strutturati sui voli pilota	Tasso di adozione della misura (% di voli idonei al test), elasticità della domanda all'acquisto dei certificati SAFc virtuali.
Vettori non partecipanti	Soggetti terzi vigilanti e garanti del mercato concorrenziale	Consultazione pubblica preventiva all'avvio della Sandbox e sessioni informative di aggiornamento sui risultati	Notifiche ufficiali al Comitato di Coordinamento	Modulo formale per la sottomissione di osservazioni o obiezioni regolatorie	Grado di tutela e rispetto dei diritti storici degli slot di scalo, tasso di discriminazioni commerciali riscontrate o ricorsi antitrust.

Tabella 24- Stakeholder engagement plan proposto per il caso di studio.

5.4.3 Definizione dello scopo e degli obiettivi della sandbox

La definizione preliminare dello scopo e degli obiettivi della sandbox costituisce un pilastro fondante per la legittimazione istituzionale dello spazio di sperimentazione regolatoria.

Lo scopo della sandbox proposta nel seguente lavoro di tesi è quello di mettere in atto un ambiente di sperimentazione pratico che testi un incentivo di natura puramente operativa e organizzativa in grado di generare un vantaggio economico e commerciale per le compagnie che sostengono l'extra-costo dei carburanti sostenibili per l'aviazione (SAF) al fine di abbattere i livelli di emissione ambientale attribuiti al settore aereo. Il modello intende esplorare la fattibilità di utilizzare la capacità operativa dello scalo concedendo un corridoio preferenziale a chi acquista saf, come una "moneta di scambio" in grado di orientare le scelte di rifornimento dei vettori, senza richiedere stanziamenti statali o alterare l'equilibrio di bilancio della società di gestione aeroportuale. Tramite la sperimentazione della priorità operativa degli slot sulla tratta, sarà possibile raccogliere evidenze empiriche e dati reali sulla reattività dei vettori alle modifiche dell'attuale sistema di assegnazione delle bande orarie, fornendo alle autorità di vigilanza (ENAC e ART) e al Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti gli elementi necessari per valutare una futura integrazione di criteri di sostenibilità ambientale all'interno dei regolamenti ordinari.

In Figura 5.5 è stata riportata inoltre una rappresentazione dei tre macro-obiettivi strategici che il progetto sperimentale intende perseguire.



Figura 5.5- Obiettivi della sandbox proposta nel caso studio.

Sotto il profilo commerciale, il valore economico dell'incentivo risiede nell'attribuzione al vettore sostenibile di un diritto di precedenza in lista d'attesa per i processi di assegnazione degli slot orari rispetto ai concorrenti alimentati a combustibile fossile. Questo meccanismo assicura che, qualora si liberino bande orarie strategiche nel corso della stagione (restituite da altri vettori o come conseguenza dell'applicazione di rimedi correttivi imposti dalle autorità antitrust europee in occasione di

concentrazioni e fusioni societarie come nel caso Lufthansa-ITA[7] [83]), la compagnia aerea partner della sandbox sia la prima a poterle riscattare.

La possibilità di migliorare anche parzialmente il posizionamento orario dei propri voli verso fasce commerciali più attrattive per la clientela d'affari consente di generare flussi di ricavo altrimenti preclusi dalla rigidità del sistema ordinario degli slot. Questo vantaggio operativo si integra con i rilevanti benefici economico-regolatori previsti a livello europeo per l'uso dei carburanti alternativi. All'interno del sistema di scambio delle quote di emissione dell'Unione Europea (EU ETS), il SAF viene classificato come "*zero-rated*"[31] infatti le emissioni di carbonio generate dalla loro combustione vengono contabilizzate come pari a zero. Questa disposizione esenta la compagnia aerea dall'obbligo di acquistare costosi permessi di emissione sul mercato secondario. A questo risparmio si aggiunge la possibilità di accedere alle *SAF Allowances* [84], speciali quote di emissione gratuite che l'Unione Europea distribuisce fino al 2030 [84] ai vettori proprio per co-finanziare e rimborsare direttamente gran parte del *green premium* del carburante ecologico.

[7] Nell'operazione di merge tra Lufthansa, MEF e ITA Airways, la Commissione europea (2024) ha imposto la restituzione di 148 slot settimanali in estate e 136 in inverno presso l'aeroporto di Milano Linate per mitigare il rischio di concorrenza sul mercato [83].

5.4.4 Piano di valutazione delle risorse necessarie all'attivazione della sandbox

L'*OECD Toolkit* sottolinea come le sandbox siano iniziative che necessitano di un impiego intensivo di risorse [26]. Al fine di garantire la sostenibilità operativa del progetto per la sua intera durata, si definisce il piano di fabbisogno delle risorse umane, tecnologiche e finanziarie in Tabella 25.

Matrice di valutazione del fabbisogno di risorse						
Risorsa	**Stato attuale**	**Fabbisogno per il test**	**Livello di priorità**	**Fonte**	**Rischi in caso di assenza della risorsa**	**Scadenza dell'acquisizione[8]**
Tempo	Nessun test regolatorio attivo nell'aviazione italiana	Periodo sperimentale di 12 mesi (corrispondenti a due stagioni di traffico consecutive).	Alto	Delibera e autorizzazione dell'ENAC	Mancata raccolta di dati statisticamente significativi sull'efficacia del progetto	60 giorni dal lancio
Persone	Staff ENAC e Assoclearance svolgono compiti di ordinaria gestione e supervisione del sistema di assegnazione degli slot orari	Deve essere istituito un team dedicato per la progettazione e valutazione della sandbox durante l'intero ciclo vita del progetto	Alto	Assegnazione temporanea di risorse interne e selezione di consulenti esterni indipendenti	Ritardi nei controlli contabili, interruzione del progetto per irregolarità della procedura, rallentamenti nel procedimento di approvazione della deroga normativa	60 giorni dal lancio
Infrastrutture tecnologica	Sistemi ordinari di programmazione degli slot orari	Database di contabilità semplificato per la registrazione, tracciabilità e annullamento dei certificati SAFc	Alto	Fornitore IT esterno accreditato sotto il coordinamento di Assoclearance	Errori nella gestione contabile in assenza di un sistema informativo dedicato, lentezza nei controlli, vulnerabilità informatiche, rischio di doppi conteggi dei certificati	10 giorni dal lancio
Fondi	Nessun fondo dedicato alle sperimentazioni riguardanti una modifica del sistema di assegnazione degli slot sulla base di criteri ambientali	Fondo per la copertura dei costi IT e di audit indipendente	Medio	Cofinanziamento tramite fondi di ricerca ENAC e di riserva dei gestori aeroportuali	interruzione del progetto	45 giorni dal lancio

Tabella 25- Valutazione del fabbisogno di risorse per l'attivazione della sandbox del caso studio.

[8] Dati indicativi, da definire in sede di progettazione finale ed in considerazione delle risorse assegnate.

5.5 Step 2: esecuzione della regulatory sandbox

Il passaggio alla fase esecutiva si apre formalmente con la definizione della struttura del *Testing Plan* che ogni operatore candidato deve elaborare e allegare alla domanda di ammissione per poter partecipare al progetto sperimentale, come riportato nello schema in Figura 5.6.

	The RS Blueprint: *Enter Project Name Here*	*This section provides a step-by-step guide for executing the regulatory sandbox. It covers the design of a testing plan including objectives, criteria, and methodologies for the sandbox. It outlines drawing up an agreement on terms, where all stakeholders align on roles, responsibilities, and expectations. It addresses risk management and mitigation strategies. Finally, it offers guidance on collecting and managing data, establishing robust systems for secure data handling, and ensuring accurate and actionable decision-making.*		
	STEP 2: Executing the RS			
Stage	**2.1 Design the Testing Plan**	**2.2 Draw up an Agreement on Terms**	**2.3 Risk management and mitigation**	**2.4 Collect and manage data**
Consider	What is the scope of our RS? What are the testing stages and methodologies you will use? What are the rules of engagement? Who will be involved?	What is the time horizon of our RS? Who is responsible for what? How do we collect date and keep track of progress?	What are the potential risks involved? How will you mitigate those risks?	Set-up robust data management system
Action points	**#1 Develop clear guidelines to help the participants structure a testing plan** to evaluate innovation within the RS. Each testing plan should be proposed by RS participants and evaluated by the RS team on a case-by-case basis. The testing plan should, at minimum, contain the following key elements: (1) Objective and Scope – Clearly define the goal of the sandbox test, specifying the technologies, geographical coverage, scaling potential, and participants involved (2) business-related KPIs; (3) Data Collection – outline what data is required, who will collect it, and how it will be reported (4) Time Period – Establish a testing duration; (5) Responsibilities and procedures (6) Check-ins to monitor progress and address emerging risks. . **#2 Onboard the participants**. Inform successful applicants of their selection and guide them through the onboarding process ensuring that approved participants are formally confirmed, aligned on testing and exit plans, complete administrative and regulatory requirements, set up their testing environment, and receive ongoing support Example: testing a new AI-driven loan approval process, the testing plan might include setting up a pilot with a limited number of users, defining key metrics such as approval accuracy and processing time, and comparing these against the current system. The plan would specify the duration of the test (e.g., three months), detail the data collection methods, and outline how you will analyse the results to determine if the AI system is both effective and compliant with existing regulations.	**#1 Draw up the RS Agreement on Terms** The Agreement formalises the commitments and expectations derived from the Testing Plan. Clearly outline the specific terms and conditions that will govern the operation of the RS including roles, responsibilities, and expectations. **#2 Negotiate and Finalise Agreements**: Engage with all relevant stakeholders to discuss, negotiate, and reach consensus on the agreed-upon terms, ensuring alignment with the RS objectives. **#3 Document the Agreed Terms**: Create a formal, written agreement that captures all the negotiated terms, ensuring clarity and mutual understanding among all parties involved.	**#1 Conduct a thorough risk analysis** to pinpoint all possible risks associated with the regulatory sandbox (RS), considering operational, financial, regulatory, and reputational factors. **#2 Evaluate each identified risk** in terms of its potential impact and the likelihood of occurrence, prioritising those that could significantly affect the RS. **#3 Develop Risk Mitigation Strategies**. Create specific plans and actions to reduce or eliminate the identified risks, ensuring that these strategies are practical and effective in minimising potential negative outcomes. **#4 Implement and Monitor Risk Mitigation Measures**	**#1 Ensure high quality of collected data** through data management processes and criteria. **#2 Establish a reliable and efficient system to collect, store, and manage the data** generated during the RS. A robust data management system ensures that all data is securely stored, easily accessible, and properly organised for analysis. Example: RS testing a new fintech application, you'll need a data management system that securely stores transaction data, user interactions, and compliance logs. It allows easy access for analysis while ensuring that sensitive information is protected in line with data privacy regulations.
Inspiration	For detailed guidance on typical elements of a testing plan, see **Instruction 4 – Testing Plan** To successfully onboard participants, see **Instruction 5 – Onboarding of participants (Step 2)**		For detailed instructions on risk management, see **Instruction 6 – Risk Identification, Management and Mitigation**.	For detailed guidance on ensuring data management, see **Instruction 7 – Data Management System (Step 2)** and **Instruction 8 – Data Collection and Monitoring Arrangements (Step 2)**.

Figura 5.6- Step 2: esecuzione della RS.

5.5.1 Valutazione delle candidature e stesura del Testing Plan

Dopo aver ricevuto le domande di partecipazione dei soggetti interessati, il team di coordinamento della sandbox procederà a valutarle secondo i criteri di eleggibilità della Tabella 23. In caso di valutazione positiva della proposta, verrà comunicata la conferma di accettazione ai candidati e i loro nomi pubblicati sulla pagina web [26].

Una volta ammessi, il team della sandbox insieme agli stakeholders affiancherà i partecipanti per redigere il *Testing Plan* definitivo, nonché per fornire supporto durante la fase di preparazione che precede il lancio ufficiale del test [26] .

Al fine di guidare i candidati nella compilazione della documentazione, l'*OECD Regulatory Sandbox Toolkit (2025)* raccomanda al Regolatore di proporre delle linee guida che ne impongano una struttura standardizzata. Ad esempio, si potrebbe valutare la proposta di un modulo strutturato in macroaree, progettate per raccogliere i dati e le credenziali indispensabili per abilitare il progetto. In Tabella 26 viene riportato un possibile modello da cui partire per la costruzione del modulo proposto, contenente le informazioni essenziali secondo il *toolkit* dell'OECD.

Testing plan	
Sezioni obbligatorie	**Informazioni aggiuntive**
Scopo ed obiettivi del test	Descrizione dettagliata della tecnologia utilizzata, del perimetro geografico dell'esperimento e dei partecipanti coinvolti
Organizzazione e metodologia	Descrizione di ciascuno stadio del test e definizione del numero di eventuali iterazioni
Metriche e KPI di successo	Delineare i criteri di successo quantitativi e qualitativi
Raccolta e gestione dei dati	Selezione dei dati da raccogliere, del soggetto incaricato della gestione, delle modalità di reporting e dei protocolli da adottare
Intervallo temporale	Definizione dell'arco temporale in cui si svolgerà la sperimentazione e dei milestone da raggiungere
Definizione delle responsabilità	Per ciascuno stadio, fornire la mappatura di tutti gli attori necessari e assegnazione dei ruoli e incarichi
Mappatura dei rischi	Sintetizzare i rischi principali che il test potrebbe comportare, nonché i presidi di salvaguardia da adottare per mitigarli, includendo piani di uscita in caso di fallimento o di rischi imprevisti
Procedure di comunicazione	Elaborazione di una strategia di comunicazione per un pubblico più ampio

Tabella 26- Struttura generale del testing plan.

5.5.2 Identificazione e gestione dei rischi

Proseguendo con le "*instruction 6*", l'*OECD Regulatory Sandbox Toolkit (2025)* fornisce il framework generico di gestione dei rischi da declinare sulla base del *Testing Plan* specifico presentato da ciascun singolo operatore ammesso alla sperimentazione.

Per la realizzazione della Tabella 27, non disponendo di un piano di testing tecnico dettagliato, si è deciso di inserire i macro-rischi più generali legati all'implementazione della proposta presentata al capitolo 5.1, raggruppandoli secondo le cinque categorie definite dal *toolkit* internazionale dell'OECD.

Quali sono i potenziali rischi?	Come verranno mitigati?
Mercato • Integrità di mercato: presentazione di certificati *SAFc* non validati da schemi di certificazione accreditati o che sono stati manipolati da parte dei vettori partecipanti per ottenere impropriamente slot prioritari di scalo • Distorsione della competizione: la sandbox potrebbe generare dei vantaggi ingiusti ai vettori partecipanti rispetto ai concorrenti esclusi, con potenziali violazioni della disciplina antitrust del mercato	• Integrazione del registro contabile di Assoclearance con la Union Database (UDB) europea per la verifica in tempo reale • Clausola penale di esclusione dal test e sanzioni da parte dell'ENAC • Accesso al bando di ammissione pubblico, trasparente e non discriminatorio • Limitazione al solo pool comune di scalo (5%-10%) per la salvaguardia assoluta dei diritti storici previsti dalle condizioni operative ordinarie
Consumatori • Protezione del consumatore: potenziale generazione di ritardi a cascata per i passeggeri dei voli commerciali ordinari a causa della deviazione dei flussi di decollo • Assenza di tutela: disservizi o cancellazioni impreviste a causa dell'interruzione o rimodulazione dei voli all'interno del programma sperimentale	• La prioritizzazione degli slot non altera gli orari di partenza effettivi pianificati dei voli concorrenti • Piena applicazione del Regolamento (CE) n. 261/2004 in materia di compensazione e assistenza ai passeggeri [63]
Ambiente • Vigilanza ambientale: possibili rischi di greenwashing derivante dall'emissione di certificati virtuali che non viene corrisposto dal rifornimento fisico degli aerei della tratta • Rischi di sostenibilità: rallentamento degli investimenti a lungo termine volti alla costruzione delle infrastrutture e impianti dedicati ai SAF sul territorio nazionale	• Riconoscimento esclusivo di certificati conformi a standard riconosciuti a livello internazionale • Obbligo di annullamento del certificato (*retirement*) del lotto virtuale una volta che ne viene rivendicato l'uso per un volo specifico • Limitazione temporale della sandbox • Vincolo di allineamento del test alla Roadmap strategica dell'ENAC
Società • Disuguaglianza sociale: concentrazione dei benefici ambientali solo sugli hub maggiori, selezionati per l'esecuzione della sandbox, penalizzando gli scali minori nazionali. • Fiducia pubblica: perdita di credibilità del regolatore (ENAC) e dell'intero sistema dell'aviazione civile in caso di anomalie procedurali o truffe contabili	• La sandbox è progettata come test pilota scalabile,per cui le procedure e il software sviluppati saranno standardizzati per poter essere estesi all'intera rete nazionale in caso di insuccesso • Valutazione della trasparenza delle operazioni da parte di società esterne sulla trasparenza delle operazioni
Altro • Incompatibilità o latenza nella trasmissione dei dati tra sistemi informativi: se il sistema ha un ritardo, la torre di controllo potrebbe non ricevere in tempo la notifica dello "status green" del volo, costringendo a inserimenti manuali o alla perdita della priorità per quel giorno • il volo prioritario a SAF subisce un'avaria tecnica o un ritardo improvviso a terra superiore a una tolleranza massima consentita	• Sviluppo di un protocollo di interscambio dati standardizzato in caso di anomalie • Applicazione di una procedura di emergenza: la priorità di utilizzo dello slot decade istantaneamente e viene ripristina la sequenza di partenza ordinaria per evitare qualsiasi effetto domino o congestione sistemica sulla rampa

Tabella 27- Matrice di identificazione e gestione dei rischi.

Come raccomandato dalle linee guida OECD, per far fronte a rischi non identificabili ex-ante, durante lo svolgimento della sandbox possono essere implementate quattro strategie mostrate in Tabella 28, di cui se ne forniscono dei possibili esempi.

Piano di gestione dei rischi inaspettati	
Strategia	**Esempio applicativo[9]**
Approccio precauzionale	Durante l'intera esecuzione, ENAC e Assoclearance monitorano l'evoluzione dei mercati virtuali secondari del SAF per prevenire anomalie speculative prima che generino distorsioni sistemiche
Clear stop-loss ed escalation triggers: determinazione delle soglie critiche di modifica o interruzione automatica dei test per prevenire o limitare effetti negativi.	Qualora si registrino controversie contabili sul 5% dei certificati presentati, o anomalie nei tempi di decollo di scalo che compromettano la puntualità generale del terminal pilota per più di 3 giorni consecutivi, la prioritizzazione degli slot viene immediatamente congelata
Rapid Response Protocols: definizione di procedure interne chiare per la gestione di rischi emergenti	Costituzione di una *task force* abilitata a intervenire e deliberare in via d'urgenza entro 24 ore dalla notifica di un'anomalia
Canali continui di feedback loops: programmazione di canali di comunicazione tra i partecipanti della sandbox, regolatori e stakeholder per efficientare il flusso di informazioni	Sessioni di allineamento operativo tra i referenti rampa dei vettori partner e Assoclearance per condividere i dati e identificare colli di bottiglia operativi emergenti

Tabella 28- Possibili strategie di gestione dei rischi imprevisti.

[9] Proposte formulate su ipotesi, da definire in sede di progettazione finale ed in considerazione delle risorse assegnate.

Conclusioni

Nel presente documento è stato affrontato il tema relativo ad una delle sfide più complesse e urgenti della transizione ecologica per aviazione quale la decarbonizzazione del settore attraverso l'adozione dei carburanti sostenibili (SAF). L'entrata in vigore del Regolamento europeo *ReFuelEU Aviation* ha imposto una drastica accelerazione a questo processo, introducendo obblighi crescenti di miscelazione dei combustibili che i destinatari dei mandati di conformità sono tenuti a soddisfare per evitare di incorrere in severe sanzioni irrogate dalle autorità competenti nazionali, appositamente designate per l'applicazione diretta del regolamento.

L'indagine svolta mette in luce l'esistenza di un profondo disallineamento tra gli attori della filiera dei SAF in Italia. Dal lato dell'offerta fisica di carburante, la società storica Eni si configura come l'unico produttore attivo nello scenario nazionale grazie al suo programma di riconversione delle raffinerie di Porto Marghera e Livorno e l'avvio di impianti per la produzione di biocarburante grezzo come quello di Gela. Nonostante la capacità produttiva italiana stimata risulti teoricamente sufficiente a soddisfare le quote richieste nel breve e medio termine (2025-2030), essa si scontra con severe barriere di distribuzione logistica su tutti gli scali italiani. A questo si aggiunge l'incertezza legata all'approvvigionamento e alla concorrenza internazionale sulle materie prime biologiche di scarto (*feedstock*) e, soprattutto, con l'impossibilità strutturale di coprire l'impennata dei target comunitari nel lungo periodo (2035-2050) quando supereranno le capacità fisiche e tecnologiche attualmente pianificate dagli operatori nazionali. Dal lato della domanda, le compagnie aeree, non disponendo di aiuti economici diretti di supporto che mitighino l'extra-costo dei biocarburanti, sono disincentivate a stringere accordi pluriennali con i fornitori di un carburante il cui costo è oggi significativamente superiori rispetto al cherosene di origine fossile.

In questo contesto di asimmetria tra i vincoli fisici di fornitura e la sostenibilità economica dei vettori aerei, la progettazione di una *regulatory sandbox* si configura come un piano strategico per sperimentare l'efficacia di leve incentivanti innovative all'interno di un ambiente protetto e temporalmente circoscritto. Partendo dall'analisi degli stakeholder affrontata nel Capitolo 3 è stato possibile delineare una panoramica generale dei soggetti che potrebbero beneficiare dello strumento regolatorio e di quelli la cui presenza è indispensabile per poterlo realizzare e mettere in atto, definendone la ripartizione dei compiti. A seguire, sono state presentate nel dettaglio quattro diverse leve d'intervento (Contratti per Differenza, sistema Book & Claim, sub-articolazione delle tariffe aereoportuali e prioritizzazione nell'assegnazione delle bande orarie a favore dei vettori ecologici) la cui adozione nello scenario italiano permetterebbe di abbattere le barriere che attualmente ostacolano la diffusione dei SAF. La validazione della leva regolatoria da testare prioritariamente all'interno della sandbox è stata affidata ad un'analisi decisionale multicriterio (MCDA). L'applicazione del modello decisionale e la successiva conduzione di un test di sensitività hanno confermato che la soluzione della "prioritizzazione degli slot" risulta essere quella più adatta. Tale misura, posizionandosi al primo posto in 3 scenari su 5, si dimostra l'opzione meno rischiosa per lo Stato, garantendo un incentivo operativo dal costo nullo per le finanze pubbliche e permettendo di avviare tempestivamente il progetto pilota sfruttando canali operativi e procedure nazionali già consolidati.

In conclusione, la costruzione di una regulatory sandbox nazionale incentrata sulla prioritizzazione degli slot aereoportuali combinata con un sistema semplificato di Book & Claim locale potrebbe rappresentare il tassello iniziale di un disegno strategico di più ampio respiro. La sperimentazione nazionale proposta costituisce infatti un banco di prova per la raccolta di dati empirici volti a sostenere lo sviluppo di un progetto più complesso, rappresentato da un sistema di Book & Claim internazionale pienamente integrato. Solo attraverso il superamento dei limiti logistici e l'adozione di un registro virtuale globale dei certificati SAF sarà possibile prevenire il divario tra hub di piccole e grandi dimensioni, e sbloccare in modo permanente l'adozione dei *Sustainable Aviation Fuels* su scala globale.

Bibliografia e sitografia

[1] Zheng, X. S., Mukhopadhaya, J., Benoit, J., Kumar, S. N., Rutherford, D., Rhode, D., & Sitompul, D. (2025). *Aviation Vision 2050: The potential for climate-neutral growth* (ICCT ID 445). International Council on Clean Transportation https://theicct.org/publication/aviation-vision-2050-sept25/ (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[2] Regolamento (UE) 2023/2405 del Parlamento europeo e del Consiglio del 18 ottobre 2023 sulla garanzia di condizioni di parità per un trasporto aereo sostenibile (ReFuelEU Aviation), in GU L del 31.10.2023. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/02405/oj?locale=it (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[3] El Helou, I. (2024). *ReFuelEU Aviation's Targets: A Feasibility Assessment* (Technical Report). Future Cleantech Architects. https://fcarchitects.org/content/refueleu-targets-sustainable-aviation-fuels-report/ (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[4] Boeing. (2008, 24 febbraio). *Boeing, Virgin Atlantic and GE Aviation to fly first commercial jet on biofuel* [comunicato stampa]. https://boeing.mediaroom.com/2008-02-24-Boeing-Virgin-Atlantic-and-GE-Aviation-to-Fly-First-Commercial-Jet-on-Biofuel (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[5] Airbus. (2021, 29 novembre). *First in-flight 100% sustainable-fuels emissions study of passenger jet shows early promise* [comunicato stampa]. https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2021-11-first-in-flight-100-sustainable-fuels-emissions-study-of-passenger (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[6] CAAFI – Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative. (s.d.). *Fuel qualifications*. Recuperato il 27 agosto 2026, da https://www.caafi.org/fuel-qualifications

[7] Chiaramonti, D., & Prussi, M. (2026). *Sustainability certification guidelines and ad-hoc support* (Report No. ED21153, Issue 2.0). EU SAF Clearing House, Ricardo / European Union Aviation Safety Agency (EASA). https://www.eusafclearinghouse.eu/saf-sustainability

[8] National Aeronautics and Space Administration. (s.d.). *Technology Readiness Levels*. NASA Space Communications and Navigation Program. Recuperato il 27 agosto 2026, da https://www.nasa.gov/directorates/somd/space-communications-navigation-program/technology-readiness-levels/

[9] CAAFI – Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative. (s.d.). *Tools*. Recuperato il 27 agosto 2026, da https://www.caafi.org/tools

[10] Chiaramonti, D., Cambini, C., Pino, F., Prussi, M., Sabatino, L., Talluri, G., Noussan, M., Ravetti, C., Pesce, D., Barchi, A. (2025). *Sustainable Aviation Fuels: tecnologie, mercato e misure verso una roadmap nazionale*. Report finale, Accordo di collaborazione tra il Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti e Politecnico di Torino.

[11] Detsios, N.; Theodoraki, S.;Maragoudaki, L.; Atsonios, K.;Grammelis, P.; Orfanoudakis, N.G. (2023). Recent Advances on Alternative Aviation Fuels/Pathways: A Critical Review. Energies 2023, 16, 1904.https://www.researchgate.net/publication/368555938_Recent_Advances_on_Alternative_Aviation_FuelsPathways_A_Critical_Review (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[12] International Air Transport Association. (2024). *Finance: Net zero CO2 emissions roadmap*. IATA Sustainability and Economics, https://www.iata.org/en/programs/sustainability/reports/financeroadmap2024/ (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[13] ICAO (International Civil Aviation Organization). (s.d.). *Production facilities*. ICAO. Recuperato il 27 agosto 2026, da SAF - Production Facilities

[14] Raul Perez-Mena, Paulina Echeverria-Paredes, Claudia Valderrama-Rios, Allyson Beall King, Manuel Garcia-Perez. (2026). *A system dynamics tool to assess the development potential of HEFA-SAF supply chains at national and regional scales, Biomass and Bioenergy, Volume 215*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953426006446 (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[15] EASA (European Union Aviation Safety Agency). (2025). *ReFuelEU Aviation annual technical report: 2024 in review*. https://www.easa.europa.eu/en/document-library/general-publications/refueleu-aviation-annual-technical-report-2025 (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[16] Regolamento (UE) 2023/2405 del Parlamento europeo e del Consiglio del 18 ottobre 2023 sulla garanzia di condizioni di parità per un trasporto aereo sostenibile (ReFuelEU Aviation), In: *Gazzetta ufficiale dell'Unione europea*, 31 ottobre 2023, L. Disponibile all'indirizzo: http://data.europa.eu/eli/reg/2023/2405/oj. (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[17] Sandford, C., & Malins, C. (2025). *Staying Aloft: Support Mechanisms for 'Sustainable Aviation Fuels' in the United Kingdom and European Union*. Cerulogy Report. London: Cerulogy. https://theicct.org/publication/support-mechanisms-for-saf-in-the-uk-and-eu-jul25/ (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[18] International Air Transport Association. (2024). *IATA BRIEF. SAF procurement: Pricing options for different strategies*. https://www.iata.org (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[19] Eni. (s.d.). *SAF Enilive, il biojet per un'aviazione più sostenibile*. Recuperato il 27 agosto 2026, da https://www.eni.com/it-IT/prodotti/mobilita/saf-eni.html

[20] Eni. (2026, maggio). *Eni: oltre 900 milioni per la transizione energetica a Porto Marghera* [Comunicato stampa]. Recuperato il 27 agosto 2026, da https://www.eni.com/it-IT/media/news/2026/05/eni-900-milioni-transizione-energetica-porto-marghera.html

[21] Eni. (s.d.). *La presenza di Eni a Livorno*. Recuperato il 28 agosto 2026, da https://www.eni.com/it-IT/azioni/attivita-mondo/italia/livorno.html (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[22] Eni. (2024, gennaio). *Ryanair e Enilive: un obiettivo comune per un'aviazione più sostenibile* [Comunicato stampa]. https://www.eni.com/it-IT/media/comunicati-stampa/2024/01/ryanair-e-enilive-un-obiettivo-comune-per-un-aviazione-piu-sostenibile.html (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[23] World Economic Forum. (2025, febbraio). *Financing Sustainable Aviation Fuels: Case Studies and Implications for Investment*. https://www.weforum.org/publications/financing-sustainable-aviation-fuels-case-studies-and-implications-for-investment/ (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[24] Van Dyk, S., & Saddler, J. (2024, Gennaio). *Progress in Commercialization of Biojet/Sustainable Aviation Fuels (SAF): Technologies and policies* (IEA Bioenergy: Task 39). IEA Bioenergy Technology Collaboration Programme. https://task39.sites.olt.ubc.ca/files/2021/08/Task-39-Progress-in-the-commercialisation-of-biojet-fuels-FINAL-August-2021.pdf (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[25] European Union Aviation Safety Agency. (2026). *2025 Aviation Fuels Reference Prices for ReFuelEU Aviation* (EASA 2026 Briefing Note). https://www.easa.europa.eu/en/document-library/general-publications/2025-aviation-fuels-reference-prices-refueleu-aviation (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[26] OECD (2025). *Regulatory Sandbox Toolkit: A Comprehensive Guide for Regulators to Establish and Manage Regulatory Sandboxes Effectively*. Technical Paper. Paris: OECD Publishing. https://www.oecd.org/en/publications/regulatory-sandbox-toolkit_de36fa62-en.html (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[27] Attrey, A., Lesher, M., & Lomax, C. (2020). *The role of sandboxes in promoting flexibility and innovation in the digital age*. OECD Going Digital Toolkit Notes, No. 2. Paris: OECD Publishing. https://www.oecd.org/en/publications/the-role-of-sandboxes-in-promoting-flexibility-and-innovation-in-the-digital-age_cdf5ed45-en.html (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[28] United Kingdom Financial Conduct Authority (2017), "Regulatory sandboxes: Lessons learned", https://www.fca.org.uk/publication/research-and-data/regulatory-sandbox-lessons-learned-report.pdf (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[29] ICAO. (2025). *Promoting regulatory sandboxes as a tool for evidence-based innovation in civil aviation*. Assembly- 42nd Session, Executive Committee (A42-WP/217). Montreal: International Civil Aviation Organization. https://www.icao.int/sites/default/files/Meetings/a42/Documents/WP/wp_217_en.pdf (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[30] Civil Aviation Authority. (2024). *Regulatory Sandbox for Hydrogen as an Aviation Fuel* (CAP 3046). West Sussex, UK: CAA. https://www.caa.co.uk/data-and-publications/publications/documents/content/cap3046/ (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[31] IATA (International Air Transport Association). (2024). *ReFuelEU Aviation handbook* (Ver. 1). IATA https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/refuel-eu-aviation-handbook.pdf (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[32] Eni. (2022, marzo). *Da Fiumicino due rotte ITA Airways alimentate da SAF* [Comunicato stampa]. https://www.eni.com/it-IT/media/comunicati-stampa/2022/03/da-fiumicino-due-rotte-ita-airways-alimentate-da-saf.html. (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[33] OECD (2025), *OECD Regulatory Policy Outlook 2025*, OECD Publishing, Paris, https://doi.org/10.1787/56b60e39-en. (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[34] Assaeroporti. (2026). *Statistiche traffico aereo: Dicembre 2025*. https://assaeroporti.com/statistiche/?selectedYear=2025&month=12 (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[35] Jeník, I., & Duff, S. (2020). *How to Build a Regulatory Sandbox: A Practical Guide for Policy Makers*. Technical Guide. Washington, D.C.: CGAP/World Bank.

https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/126281625136122935 (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[36] Navarrete, A., Baldino, C., & Pavlenko, N. (2025, July). *Industry perspectives on advanced sustainable aviation fuel: What barriers remain for these technologies to scale?*. Washington, DC: International Council on Clean Transportation (ICCT), Luglio 2025. https://theicct.org/publication/saf-what-barriers-remain-for-these-technologies-to-scale-jul25/ (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[37] Baldino, C., & Mukhopadhaya, J. (2022). *Considerations for the ReFuelEU aviation trilogue*. ICCT Briefing. Washington, D.C.: International Council on Clean Transportation. https://theicct.org/publication/refueleu-definitions-trilogue-sep22/ (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[38] Airport Council International e Aerospace Technology Institute (2022). *Integration of sustainable aviation fuels into the air transport system*. https://www.ati.org.uk/news-events/news/ati-aci-world-launch-new-saf-paper/(ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[39] Eni. (2026, 25 febbraio). *Eni: confermato l'investimento per lo sviluppo della bioraffinazione a Sannazzaro de' Burgondi* [Comunicato stampa]. https://www.eni.com/it-IT/media/comunicati-stampa/2026/02/eni-confermato-investimento-sviluppo-bioraffinazione-sannazzaro-de-burgondi.html (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[40] European Commission, Directorate-General for Research and Innovation. (2024). *Development of outlook for the necessary means to build industrial capacity for drop-in advanced biofuels: Final report*. Publications Office of the European Union. https://doi.org/10.2777/679307 (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[41] Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative (CAAFI). (2025). *Path to Alternative Jet Fuel Readiness*. https://caafi.com/tools/Path_to_Alternative_Jet_Fuel_Readiness.html (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[42] UK Civil Aviation Authority. (2024). *First companies for Hydrogen Challenge announced by aviation regulator* [Comunicato stampa]. https://www.caa.co.uk/newsroom/news/first-companies-for-hydrogen-challenge-announced-by-aviation-regulator/ (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[43] ZeroAvia. (2024). *ZeroAvia invited to join second round of UK CAA's Hydrogen Sandbox Challenge* [Comunicato stampa]. https://zeroavia.com/zeroavia-invited-to-join-second-round-of-uk-caas-hydrogen-sandbox-challenge/ (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[44] UK Civil Aviation Authority. (2024). *UK on course to lead world in hydrogen fuel as aviation regulator expands Hydrogen Challenge* [Comunicato stampa]. https://www.caa.co.uk/newsroom/news/uk-on-course-to-lead-world-in-hydrogen-fuel-as-aviation-regulator-expands-hydrogen-challenge/ (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[45] EASA (European Union Aviation Safety Agency). (s.d.). *ReFuelEU Aviation digital reporting tool*. Recuperato il 27 agosto 2026, da https://www.easa.europa.eu/en/domains/environment/refueleu-aviation-digital-reporting-tool

[46] Ricardo. (s.d.). *EU SAF Clearing House*. Recuperato il 27 agosto 2026, da https://www.ricardo.com/en/projects/eu-saf-clearing-house

[47] STARGATE Consortium. (s.d.). *Accelerating Greener Aviation*. https://www.greendealstargate.eu/ (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[48] STARGATE Consortium. (2025, 1 luglio). *Shared bikes at Brussels Airport: A green last mile solution*. Green Deal STARGATE. https://www.greendealstargate.eu/news/shared-bikes-at-brussels-airport-a-green-last-mile-solution/ (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[49] STARGATE Consortium. (2025, 20 gennaio). *Green electricity: Sharing with airports neighbours*. Green Deal STARGATE. https://www.greendealstargate.eu/news/ green-electricity-sharing-with-airports-neighbours/ (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[50] STARGATE Consortium. (2025, 1 febbraio). *Inspiring greener journeys to and from Brussels Airport*. Green Deal STARGATE. https://www.greendealstargate.eu/news/inspiring-greener-journeys-to-and-from-brussels-airport/ (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[51]STARGATE Consortium. (2023, 18 dicembre). *Sustainable Aviation Fuel explained*. Green Deal STARGATE. https://www.greendealstargate.eu/news/stargates-hydrogen-airport-study/ (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[52] STARGATE Consortium. (s.d.). *Sustainable Aviation Fuel*. Green Deal STARGATE https://www.greendealstargate.eu/news/sustainable-aviation-fuel/ (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[53] Airports Council International, & Aerospace Technology Institute. (2022). Integration of Sustainable Aviation Fuels into the air transport system. https://www.ati.org.uk/wp-content/uploads/2022/04/ATI-Tech-Strategy-2022-Destination-Zero.pdf (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[54] Enilive. (2026, 27 maggio). Enilive pubblica il nuovo Report di Sostenibilità e il Bilancio 2025 [Comunicato stampa]. https://www.eni.com/it-IT/media/comunicati-stampa/2026/05/enilive-pubblica-nuovo-report-sostenibilit-bilancio-2025.html (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[55] Eni. (2026). Eni for 2025: A just transition. Report di sostenibilità. https://www.eni.com/it-IT/media/comunicati-stampa/2026/05/eni-pubblica-il-report-eni-for-2025.html (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[56] International Air Transport Association. (2026). *Access to fuel infrastructure to enable aviation's decarbonization* [IATA Brief]. https://www.iata.org/en/programs/sustainability/reports/access-to-fuel-infrastructure-report/ (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[57] Gruppo SEA. (2026). Rendicontazione consolidata di sostenibilità 2025. SEA Milan Airports. https://milanairports.com/it/rendicontazione-consolidata-di-sostenibilita-2025 (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[58] Redazione ANSA. (2024, 19 aprile). Sea alza incentivo per carburanti verdi a Linate e Malpensa. ANSA.it. https://www.ansa.it/lombardia/notizie/2024/04/19/sea-alza-incentivo-per-carburanti-verdi-a-linate-e-malpensa_1c391f67-6d9f-4d2c-9b3b-ffd58a2dd844.html (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[59] Eni e Aeroporti di Roma. (2021, 14 settembre). Accordo Eni-Aeroporti di Roma per lo sviluppo di biocarburanti per l'aviazione [Comunicato stampa]. https://www.eni.com/it-IT/media/comunicati-stampa/2021/09/cs-accordo-eni-aeroporti-roma-biocarburante.html (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[60] Direttiva (UE) 2023/958 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 10 maggio 2023, recante modifica della direttiva 2003/87/CE per quanto riguarda il contributo del trasporto aereo all'obiettivo di riduzione delle emissioni in tutti i settori dell'economia dell'Unione e recante adeguata attuazione di una misura mondiale basata sul mercato. (2023). *Gazzetta ufficiale dell'Unione europea*, L 130, 115-133. http://data.europa.eu/eli/dir/2023/958/oj (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[61] EASA (European Union Aviation Safety Agency). (s.d.). *EU Flight Emissions Label (FEL)*. Recuperato il 287 agosto 2026, da https://www.easa.europa.eu/en/domains/environment/eu-flight-emissions-label-fel

[62] Gruppo SAVE. (2025). *Bilancio di sostenibilità 2025*. https://ambiente.veneziaairport.it/temi-ambientali/bilancio-di-sostenibilita/archivio-documenti/report-bilanci-di-sostenibilita.html (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[63] ART (Autorità di Regolazione dei Trasporti). (2025). *Relazione Annuale al Parlamento 2025*. https://www.autorita-trasporti.it/relazioni-annuali/relazione-annuale-2025/ (ultimo accesso: 27 agosto 2026)

[64] ENAC (Ente Nazionale per l'Aviazione Civile). (2024). *Una roadmap per i Sustainable Aviation Fuels in Italia: Percorso dell'Enac per la definizione di SAF policy*. Direzione Ambiente e Mobilità Sostenibile. https://www.enac.gov.it/pubblicazioni/una-roadmap-per-i-sustainable-aviation-fuels-in-italia-percorso-dellenac-per-la-definizione-di-saf-policy/ (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[65] European Commission. (2025). *Carbon contracts for difference schemes for industrial decarbonisation under the CEEAG: State aid guidance for Member States*. European Union. https://competition-policy.ec.europa.eu/document/download/42330cc4-d31e-41cf-ae353db7ab933331_en?filename=20260717_guidance_on_carbon_contracts_for_difference.pdf (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[66] Demurtas, A., Ansarin, M., Bene, C., Kralli, A., Van Delzen, T., & Van Nuffel, L. (2026). *Overview of the diffusion of Power-purchase-agreements and Contracts-for-difference across Member States: Existing barriers and tools to favour their uptake*. European Parliament, Policy Department for Transformation, Innovation and Health. https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/4f820f39-f677-11f0-b9bc-01aa75ed71a1/language-en (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[67] Murfet, C. (2025). *Carbon Contracts for Differences in Europe* (Global CCS Institute Perspective). Global CCS Institute. https://www.globalccsinstitute.com/publications/carbon-contracts-for-differences-ccfds-in-europe/ (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[68] Association of Asia Pacific Airlines. (2025, 28 luglio–1 agosto). *Promoting the establishment of supporting infrastructure for regional adoption of book and claim systems to accelerate SAF deployment* (Discussion Paper No. DGCA-60/DP/07/10). 60th Conference of Directors General of Civil Aviation,

Asia and Pacific Regions, Sendai, Japan. https://www.icao.int/APAC/meetingdocs?fid=8737 (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[69] Uniting Aviation. (2026, 4 gennaio). *Book and claim explained: Sustainable aviation fuels, accounting, and CORSIA*. https://unitingaviation.com/news/environment/book-and-claim-explained-sustainable-aviation-fuels-accounting-and-corsia/ (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[70] NoviqTech. (2025, 4 luglio). *Understanding the book and claim model*. https://noviqtech.com/articles/understanding-the-book-and-claim-model (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[71] World Economic Forum. (2021, novembre). *Clean Skies for Tomorrow: Sustainable Aviation Fuel policy toolkit* (Insight Report). https://www.weforum.org/publications/clean-skies-for-tomorrow-sustainable-aviation-fuel-policy-toolkit/ (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[72] Mutrelle, C. (2026, 5 maggio). *Book & Claim for SAF: A useful tool, not a silver bullet* [Presentazione di diapositive]. European Parliament TRAN Committee Hearing, Transport & Environment. https://www.europarl.europa.eu/committees/it/public-hearing-on-book-and-claim-of-sust/product-details/20260427CHE14122 (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[73] Westermair, F. (2026, 5 maggio). *Book and claim of sustainable aviation fuels: The airport perspective* [Presentazione di diapositive]. European Parliament TRAN Committee Hearing, Transport & Environment. https://www.europarl.europa.eu/committees/it/public-hearing-on-book-and-claim-of-sust/product-details/20260427CHE14122 (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[74] Paschke, B. (2026, 5 maggio). *Book and claim for sustainable aviation fuels (SAF)* [Presentazione di diapositive]. European Parliament TRAN Committee Hearing, Transport & Environment. https://www.europarl.europa.eu/committees/it/public-hearing-on-book-and-claim-of-sust/product-details/20260427CHE14122 (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[75] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. (2026, giugno). *Piano Nazionale degli Aeroporti 2026-2035*. In collaborazione con Ente Nazionale per l'Aviazione Civile. https://www.mit.gov.it/progetto/proposta-di-piano-nazionale-degli-aeroporti-2026-2035 (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[76] Autorità di Regolazione dei Trasporti. (2023). *Modelli di regolazione dei diritti aeroportuali* (Allegato A alla Delibera n. 38/2023 del 9 marzo 2023). https://www.autorita-trasporti.it/delibere/delibera-n-38-2023/ (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[77] Gruppo SEA. (2025). *Relazione Annuale Finanziaria 2025*. Società Esercizi Aeroportuali S.p.A. https://milanairports.com/it/rendicontazione-consolidata-di-sostenibilita-2025 (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[78] Ente Nazionale per l'Aviazione Civile. (2009, 24 agosto). *Assegnazione di bande orarie sugli aeroporti coordinati nazionali* (Circolare EAL-18). https://www.enac.gov.it/la-normativa/normativa-enac/eal-18/ (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[79] Unione europea. (2022, 24 febbraio). *Regolamento (CEE) n. 95/93 del Consiglio, del 18 gennaio 1993, relativo a norme comuni per l'assegnazione di bande orarie negli aeroporti della Comunità* (Testo consolidato al 24 febbraio 2022). EUR-Lex. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:01993R0095-20220224 (ultimo accesso: 27 Agosto 2026)

[80] Finger, M., Montero, J., & Serafimova, T. (2019). *Navigating towards a more efficient airport slots allocation regime in Europe* (Policy Brief Issue No. 2019/17; European Transport Regulation Observer). Robert Schuman Centre for Advanced Studies, European University Institute. https://cadmus.eui.eu/entities/publication/7d620aea-2f87-5bbc-a957-23079ee82c3e (ultimo accesso: 27 agosto 2026)

[81] Airports Council International, International Air Transport Association, & Worldwide Airport Coordinators Group. (2025). *Worldwide airport slot guidelines (WASG)* (4ª ed.). https://www.iata.org/en/programs/ops-infra/slots/slot-guidelines/ (ultimo accesso: 27 agosto 2026)

[82] Commissione europea. (2022, 18 febbraio). Comunicazione della Commissione: Disciplina in materia di aiuti di Stato a favore del clima, dell'ambiente e dell'energia 2022 (2022/C 80/01). *Gazzetta ufficiale dell'Unione europea*, C 80, 1–89. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX:52022XC0218%2803%29 (ultimo accesso: 27 agosto 2026)

[83] Commissione europea. (2024, 3 luglio). *Decisione della Commissione che dichiara una concentrazione compatibile con il mercato interno e l'accordo SEE (Caso M.11071 – Deutsche Lufthansa/MEF/ITA). https://competition-cases.ec.europa.eu/cases/M.11071* (ultimo accesso: 27 agosto 2026)

[84] ICAO (Organizzazione Internazionale dell'Aviazione Civile). (2026). *Guidance on potential policies and coordinated approaches for the deployment of sustainable aviation fuels* (Versione 4). Comitato per la protezione ambientale dell'aviazione (CAEP). https://www.icao.int/SAF/saf-guidance-policy-measures (ultimo accesso: 27 agosto 2026)

[85] Eni, Aeroporti di Roma e ITA Airways. (2022, 24 marzo). Da Fiumicino due rotte ITA Airways alimentate da SAF [Comunicato stampa]. https://www.eni.com/it-IT/media/comunicati-stampa/2022/03/da-fiumicino-due-rotte-ita-airways-alimentate-da-saf.html (ultimo accesso: 27 agosto 2026)