

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale

Anno Accademico 2025/2026
Sessione di Laurea: Settembre 2026

Decarbonizzazione del Settore Aeroportuale in Italia

Relatore:
Prof. Carlo Cambini

Candidato:
Ilaria Filetti

Sommario

Il presente lavoro di tesi analizza in modo sistematico e multidimensionale le strategie di decarbonizzazione del settore aeroportuale italiano, integrando prospettive tecniche, economiche e gestionali. Il settore dei trasporti è oggi responsabile del 24% delle emissioni globali di CO_2 legate all'energia. in questo contesto, l'aviazione civile rappresenta una sfida critica per via della sua natura *hard-to-abate*, con un impatto climatico complessivo che può risultare fino a 2-3 volte superiore a quello derivante dalla sola CO_2 se si considerano gli effetti non-CO_2 (come NO_x e scie di condensazione).

L'analisi si apre con una mappatura delle fonti emissive secondo il GHG Protocol, distinguendo tra Scope 1, ovvero le emissioni dirette controllate dal gestore (mezzi di terra, caldaie), che rappresentano generalmente il 15% del totale. Scope 2, ovvero le emissioni indirette da energia elettrica acquistata, dominanti nelle operazioni dei terminal che compongono fino al 30% delle emissioni complessive e sono legate principalmente ai sistemi HVAC. Infine, Scope 3 riguarda le emissioni della catena del valore (voli, accessibilità passeggeri), che costituiscono la quota prevalente di emissioni ed incidono fino al 60% sull'impatto totale.

La ricerca valuta l'efficacia delle principali soluzioni tecnologiche attraverso un modello di *capital budgeting* basato su indicatori quali NPV (Net Present Value), IRR (Internal Rate of Return) e Payback Period (PB). Le tecnologie analizzate includono l'efficientamento energetico (HVAC e illuminazione LED), l'adozione di impianti fotovoltaici per l'autoproduzione (con riduzioni stimate di circa 828 tCO_2/anno per ogni 3,6 GWh prodotti), l'elettrificazione dei veicoli di rampa (*Ground Support Equipment*, GSE) e l'integrazione di *Sustainable Aviation Fuels* (SAF), capaci di ridurre le emissioni *lifecycle* fino all'80%.

Il cuore dell'elaborato è costituito dal caso studio dell'Aeroporto di Milano Malpensa, dove viene definita una baseline emissiva di circa 50 000 tCO_2/anno. Attraverso una simulazione di scenari dal 2030-2050, lo studio dimostra che una strategia integrata comprendente 20 MW di impianti fotovoltaici, elettrificazione dei mezzi e utilizzo di SAF permette di abbattere circa il 70% delle emissioni controllabili. L'analisi finanziaria conferma la validità degli investimenti: per l'impianto fotovoltaico da 20 MW si stima un NPV positivo di circa 8,6 milioni di euro e un Payback Period di 5,56 anni, rendendo la transizione energetica non solo un obbligo normativo, in linea con il pacchetto europeo *Fit for 55* e il *Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR)*, ma anche una leva strategica di competitività economica e resilienza.

In conclusione, la tesi evidenzia che la trasformazione degli aeroporti in smart energy hub è tecnicamente fattibile e finanziariamente sostenibile, a condizione che avvenga un buon coordinamento sistemico tra gestori aeroportuali, compagnie ae-

ree e istituzioni pubbliche per superare le barriere legate ai costi iniziali e alla disponibilità dei nuovi vettori energetici.

Ringraziamenti

Giunta alla conclusione di questo percorso, sento il bisogno di dedicare qualche parola a tutte le persone che, in modi diversi, hanno contribuito a rendere questi anni un'esperienza importante e significativa.

Un primo e sincero ringraziamento va al Professor Carlo Cambini, relatore di questa tesi, per la disponibilità, la competenza e i preziosi consigli che mi hanno accompagnato durante la realizzazione di questo lavoro.

Ringrazio la mia famiglia, per esserci sempre stata, per aver creduto in me anche nei momenti in cui io per prima facevo fatica a farlo, e per avermi sostenuta con pazienza, affetto e comprensione. Questo traguardo è anche vostro.

Un grazie speciale va agli amici di sempre, a chi c'è stato dall'inizio e a chi ho incontrato lungo il cammino. Grazie per le risate, le serate, le parole giuste al momento giusto e per essere riusciti, anche nei periodi più impegnativi, a ricordarmi di fermarmi e respirare.

Il ringraziamento più grande lo dedico a me stessa. Ho iniziato questo percorso di laurea magistrale dopo aver conseguito la laurea triennale nel dicembre 2022. Un mese prima della laurea triennale ho ricevuto un'offerta di lavoro per ricoprire il ruolo di consulente gestionale presso l'azienda nella quale avevo svolto il tirocinio. Sapevo che conciliare il lavoro con lo studio non sarebbe stato semplice, ma l'idea di poter raggiungere, già a 22 anni, una mia indipendenza economica era per me troppo allettante per rinunciarvi. Volevo dimostrare innanzitutto a me stessa che fosse possibile portare avanti contemporaneamente due impegni importanti, senza che uno dovesse necessariamente compromettere l'altro. Ma, soprattutto, volevo dimostrare che era possibile raggiungere questo obiettivo senza rinunciare alle mie passioni e alla mia vita personale. In questi anni, infatti, ho sempre fatto sport a livello agonistico, allenandomi tutti i giorni e partecipando a gare di trail running anche particolarmente impegnative. Ma la cosa di cui vado più fiera è che ho portato avanti tutto questo senza mai rinunciare alla socialità, alle amicizie e alle serate, nemmeno durante i periodi di sessione. Avere un mio stipendio mi ha permesso non solo di sostenere autonomamente le spese per un affitto a Torino, ma anche di concedermi numerosi viaggi e di partecipare a tutte le gare sportive che desideravo.

Il traguardo che raggiungo oggi non solo mi rende profondamente orgogliosa, ma rappresenta per me la dimostrazione concreta che, con impegno e determinazione, è possibile raggiungere ciò che si desidera senza dover necessariamente sacrificare le proprie passioni, i propri hobby e le proprie amicizie.

In questi anni ho combattuto soprattutto per conquistare ciò che considero una delle cose più importanti che una donna possa raggiungere: la propria indipendenza.

Un'indipendenza costruita attraverso il lavoro, lo studio e le mie passioni, che mi ha permesso di scegliere per me stessa e di vivere pienamente tutto ciò che desideravo.

Ed è proprio a questa indipendenza che io dedico questo traguardo.

Indice

Sommario **1**

Ringraziamenti **3**

1 Introduzione **7**
1.1 Contesto e rilevanza del tema 7
1.2 Obiettivi della ricerca 10
1.3 Domande di ricerca 13
1.4 Metodologia 15
1.4.1 Revisione della letteratura 16
1.4.2 Raccolta e analisi dei dati 17
1.4.3 Modellazione economico-finanziaria 18
1.4.4 Scenario analysis e simulazioni 19

2 Il settore aeroportuale **21**
2.1 Struttura e caratteristiche del sistema aeroportuale italiano 21
2.2 Stakeholder del sistema aeroportuale 25
2.3 Evoluzione storica e tendenze recenti 27
2.4 Sfide e opportunità per la decarbonizzazione del sistema aeroportuale 30

3 Emissioni e impatti ambientali **33**
3.1 Classificazione delle emissioni: Scope 1, 2 e 3 33
3.2 Fonti principali di emissione aeroportuale 35
3.3 Confronto internazionale 36
3.4 Formule e indicatori di performance ambientale 37

4 Normativa e politiche di decarbonizzazione **39**
4.1 Quadro internazionale ed europeo 39
4.2 Politiche nazionali 41
4.3 Linee guida ENAC e supporto ENEA/GSE 42
4.4 Indicatori di conformità normativa 44

5 Tecnologie per la decarbonizzazione **46**
5.1 Efficienza energetica e fonti rinnovabili 46
5.1.1 Impianti fotovoltaici 47
5.1.2 Efficientamento sistemi HVAC e illuminazione 48
5.2 Sustainable Aviation Fuels (SAF) 48

5.3 Idrogeno verde . . . 50
5.4 Elettrificazione dei mezzi di terra . . . 51
5.5 Analisi integrata e stime quantitative . . . 53

6 Analisi economico gestionale **55**
6.1 Analisi dei costi: CAPEX e OPEX . . . 55
6.2 Indicatori finanziari e ROI (Return on Investment) . . . 57
6.3 Analisi di sensitività . . . 60
6.4 Applicazione al caso studio: Malpensa . . . 60

7 Caso studio: Aeroporto di Milano Malpensa **64**
7.1 Baseline delle emissioni . . . 65
7.2 Interventi proposti . . . 66
7.3 Valutazione economica . . . 69

8 Modello e scenari futuri (2030–2050) **72**
8.1 Modello metodologico per la valutazione degli scenari di decarbonizzazione . . . 72
8.2 Scenario Intermedio (Moderato) . . . 74
8.2.1 Valutazione economica dello Scenario Intermedio . . . 81
8.3 Scenario Completo (2050) . . . 85
8.4 Confronto tra Scenario Intermedio e Completo . . . 89
8.5 Metodologia , fonti e validazione del modello . . . 92
8.5.1 Validazione delle ipotesi tecnologiche . . . 93
8.5.2 Fonti bibliografiche principali . . . 94

9 Conclusioni **96**
9.1 Considerazioni strategiche . . . 96
9.2 Limiti dello studio . . . 99
9.3 Conclusione finale . . . 102

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Contesto e rilevanza del tema

Il cambiamento climatico rappresenta una delle sfide più articolate e pervasive del XXI secolo, configurandosi come un fenomeno sistemico che coinvolge simultaneamente dimensioni ambientali, economiche, sociali, tecnologiche e geopolitiche. A differenza di altre problematiche globali, esso presenta caratteristiche di interdipendenza e non linearità, per cui gli effetti prodotti in un determinato contesto geografico possono propagarsi rapidamente su scala globale attraverso meccanismi economici e ambientali interconnessi. In particolare, la crescente integrazione tra sistemi naturali e sistemi socio-economici amplifica la vulnerabilità complessiva, rendendo necessarie politiche coordinate e approcci multilivello.

L'intensificazione degli eventi climatici estremi quali ondate di calore, precipitazioni intense, siccità prolungate e tempeste rappresenta una delle manifestazioni più evidenti di tale fenomeno. Secondo i rapporti dell'IPCC, la frequenza e l'intensità di questi eventi sono aumentate in modo significativo rispetto all'era preindustriale, con impatti diretti su infrastrutture critiche, sistemi produttivi e sicurezza delle popolazioni. Parallelamente, l'innalzamento del livello medio dei mari, stimato in accelerazione negli ultimi decenni, costituisce una minaccia concreta per le aree costiere e per le infrastrutture aeroportuali situate in prossimità del litorale, molte delle quali rappresentano nodi strategici del trasporto internazionale.

A tali fenomeni si aggiungono la perdita di biodiversità e l'alterazione dei cicli idrologici, che contribuiscono a ridurre la resilienza degli ecosistemi e ad aumentare i costi economici associati al cambiamento climatico. Tali costi si manifestano sotto forma di danni diretti alle infrastrutture, riduzione della produttività agricola, incremento dei premi assicurativi e instabilità dei mercati finanziari. In questo contesto, la mitigazione delle emissioni di gas serra assume un ruolo centrale non solo come obiettivo ambientale, ma anche come leva per garantire la stabilità economica e la sostenibilità di lungo periodo dei sistemi produttivi.

Secondo il Rapporto 2023 dell'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), il raggiungimento dell'obiettivo di contenere l'aumento della temperatura media globale entro 1,5°C rispetto ai livelli preindustriali richiede una riduzione delle emissioni globali di gas serra pari a circa il 45% entro il 2030 rispetto ai livelli del 2010. Questo target rappresenta una soglia critica oltre la quale gli impatti climatici diventerebbe-

ro significativamente più gravi e difficilmente reversibili. Inoltre, il raggiungimento della neutralità climatica (net zero) entro il 2050 implica che le emissioni residue debbano essere compensate da sistemi di assorbimento, naturali o tecnologici, come foreste o tecnologie di carbon capture.

Dal punto di vista operativo, tali obiettivi implicano una trasformazione strutturale dei sistemi energetici e produttivi. In particolare, la decarbonizzazione richiede la progressiva eliminazione dei combustibili fossili dal mix energetico, l'elettrificazione dei consumi finali nei settori industriali e dei trasporti, l'adozione di tecnologie a basse o nulle emissioni. Il miglioramento apporta un'efficienza energetica lungo tutta la catena del valore.

Questa trasformazione comporta ingenti investimenti infrastrutturali e una revisione delle politiche industriali, con implicazioni rilevanti anche per la competitività dei sistemi economici nazionali.

Il settore dei trasporti assume un ruolo centrale in questo processo di transizione. Secondo i dati riportati nei principali report internazionali (IPCC, IEA), esso è responsabile di circa il 24% delle emissioni globali di CO2 legate all'energia. Tale percentuale evidenzia come il settore rappresenti uno dei principali contributori alle emissioni antropogeniche, soprattutto a causa della forte dipendenza da combustibili fossili e della difficoltà di elettrificazione completa nel breve periodo.

Un elemento particolarmente rilevante è rappresentato dalla natura della domanda di trasporto, che risulta relativamente anelastica rispetto al prezzo, soprattutto per quanto riguarda il trasporto aereo e merci. Questo implica che aumenti dei costi energetici o introduzione di carbon pricing non si traducono immediatamente in una riduzione della domanda, ma piuttosto in un aumento dei costi complessivi del sistema. La crescita demografica globale, l'espansione delle economie emergenti e l'intensificazione degli scambi commerciali internazionali contribuiscono ulteriormente ad alimentare la domanda di mobilità, rendendo ancora più complesso il raggiungimento degli obiettivi di riduzione delle emissioni.

All'interno del settore dei trasporti, l'aviazione civile presenta caratteristiche peculiari che la rendono particolarmente critica dal punto di vista della decarbonizzazione. Negli ultimi decenni, il traffico aereo ha registrato tassi di crescita sostenuti, con un aumento significativo sia del numero di passeggeri sia dei volumi di cargo. Questo sviluppo è stato favorito dalla liberalizzazione del mercato, dall'ingresso di compagnie low-cost e dalla crescente accessibilità economica del trasporto aereo.

Nonostante il contributo diretto dell'aviazione alle emissioni globali di CO2 sia stimato intorno al 2,6%, tale valore non riflette pienamente l'impatto climatico complessivo del settore. Infatti, come evidenziato nei report IPCC, gli effetti di agenti che non siano CO2 tra cui le scie di condensazione, le emissioni di NOx e la formazione di ozono troposferico contribuiscono in modo significativo alla forzante radioattiva. In termini quantitativi, tali effetti possono portare a un impatto climatico complessivo fino a 2-3 volte superiore rispetto a quello derivante dalla sola CO2. Questo implica che le strategie di decarbonizzazione dell'aviazione devono considerare un approccio integrato, che includa sia la riduzione delle emissioni dirette sia la mitigazione degli effetti indiretti.

La complessità della decarbonizzazione del settore aeronautico è ulteriormente accentuata da vincoli tecnologici e operativi. L'elevata densità energetica richiesta

dai carburanti aeronautici rappresenta uno dei principali ostacoli all'elettrificazione, in quanto le tecnologie attuali di accumulo energetico (batterie) non sono ancora in grado di garantire le prestazioni richieste per voli a medio-lungo raggio. Inoltre, la lunga vita utile degli aeromobili (20–30 anni) rallenta il rinnovo della flotta e l'introduzione di nuove tecnologie. A ciò si aggiungono i rigorosi processi di certificazione imposti dalle autorità aeronautiche, che, pur garantendo elevati standard di sicurezza, comportano tempi lunghi per l'adozione di innovazioni tecnologiche.

In questo contesto, gli aeroporti assumono un ruolo strategico non solo come infrastrutture di supporto al trasporto aereo, ma anche come sistemi complessi ad elevata intensità energetica. Le operazioni aeroportuali includono una vasta gamma di attività, tra cui gestione dei terminal passeggeri, movimentazione bagagli, servizi di sicurezza, illuminazione delle piste, climatizzazione degli edifici (HVAC) e gestione delle flotte di veicoli di terra. Tutte queste attività contribuiscono in modo significativo al consumo energetico complessivo e alle emissioni di gas serra.

Dal punto di vista sistemico, gli aeroporti rappresentano nodi intermodali che integrano diverse modalità di trasporto (aereo, ferroviario, stradale), fungendo da hub logistici e catalizzatori di sviluppo economico. Essi contribuiscono alla competitività dei territori, facilitano l'attrazione di investimenti e supportano il settore turistico. Tuttavia, tale ruolo comporta anche una responsabilità crescente in termini di sostenibilità ambientale.

Nel contesto italiano, il sistema aeroportuale è caratterizzato da una struttura articolata che comprende hub internazionali, aeroporti regionali e scali minori. Questa diversificazione si riflette in differenti livelli di traffico, capacità infrastrutturale e disponibilità di risorse finanziarie. Secondo i dati ENAC 2025, il traffico passeggeri ha superato i 229 milioni, segnando una crescita del 5% rispetto all'anno precedente e confermando il pieno recupero rispetto ai livelli pre-pandemici. Questo dato evidenzia non solo la resilienza del settore, ma anche la crescente pressione ambientale associata all'aumento dei volumi di traffico.

Roma Fiumicino, con circa 50,9 milioni di passeggeri, rappresenta il principale hub nazionale e uno dei principali nodi europei, concentrando circa il 22% del traffico totale. Questo livello di concentrazione implica che interventi di decarbonizzazione implementati in tali hub possano avere un impatto significativo sull'intero sistema nazionale. Parallelamente, il traffico cargo, pari a oltre 1,2 milioni di tonnellate, evidenzia il ruolo crescente degli aeroporti nelle catene logistiche globali, con una prevalenza di traffico internazionale.

Dal punto di vista economico, gli aeroporti generano valore attraverso molteplici canali: contributo al PIL, occupazione diretta e indiretta, sviluppo delle filiere logistiche e incremento dell'attrattività territoriale. Tuttavia, tali benefici devono essere bilanciati con gli impatti ambientali. Le emissioni aeroportuali sono generalmente classificate secondo il GHG Protocol in Scope 1, 2 e 3:

- **Scope 1**: emissioni dirette da fonti controllate.
- **Scope 2**: emissioni indirette da energia acquistata.
- **Scope 3**: emissioni indirette lungo la catena del valore.

Questa classificazione è fondamentale per comprendere la distribuzione delle responsabilità e per identificare le leve di intervento più efficaci. In particolare, mentre Scope 1 e 2 sono direttamente gestibili dagli operatori aeroportuali, le emissioni Scope 3 richiedono un coordinamento con stakeholder esterni, come compagnie aeree e fornitori.

La crescente attenzione verso la sostenibilità ha portato allo sviluppo di strumenti di gestione ambientale e programmi di certificazione, promossi da organismi internazionali come EASA. Tali strumenti includono sistemi di monitoraggio delle emissioni, reporting ambientale e iniziative di carbon management, che consentono agli aeroporti di definire obiettivi di riduzione e monitorarne i progressi nel tempo.

In conclusione, la decarbonizzazione degli aeroporti rappresenta una sfida complessa ma strategica, che richiede un approccio integrato e multidisciplinare. Essa non è solo una risposta agli obblighi normativi europei, come il Green Deal e il pacchetto Fit for 55, ma anche un'opportunità per migliorare la competitività del settore, attrarre investimenti sostenibili e rispondere alle aspettative di un contesto economico sempre più orientato ai criteri ESG.

1.2 Obiettivi della ricerca

Il presente lavoro di tesi si propone di sviluppare un'analisi sistematica e multidimensionale delle strategie di decarbonizzazione degli aeroporti italiani, con l'obiettivo di integrare le prospettive tecniche, economiche e gestionali. Tale impostazione risponde alla natura intrinsecamente complessa del processo di decarbonizzazione, che non può essere interpretato come una semplice sostituzione tecnologica, ma richiede una trasformazione coordinata dell'intero sistema aeroportuale.

In particolare, gli aeroporti rappresentano ecosistemi articolati in cui interagiscono molteplici attori (gestori aeroportuali, compagnie aeree, handler, fornitori energetici, autorità pubbliche), ciascuno con differenti livelli di responsabilità emissiva e capacità decisionale. Di conseguenza, l'analisi proposta mira a costruire un quadro integrato che consenta di valutare simultaneamente l'efficacia ambientale degli interventi come la riduzione delle emissioni, la sostenibilità economico-finanziaria che include costi, ritorni, rischio e la fattibilità operativa e regolatoria.

L'obiettivo ultimo è individuare strategie di decarbonizzazione realisticamente implementabili nel contesto italiano, caratterizzato da forte eterogeneità tra scali in termini di dimensione, traffico e capacità di investimento.

Identificazione e quantificazione delle fonti emissive aeroportuali

- **Analisi dettagliata delle emissioni secondo lo schema Scope 1, 2 e 3 del GHG Protocol:**
  - Scope 1: emissioni dirette derivanti da combustione di carburanti nei mezzi di terra e nei generatori energetici interni all'aeroporto.

    Queste emissioni comprendono, ad esempio, i consumi di diesel dei Ground Support Equipment (GSE), i generatori di emergenza e gli impianti termici. Secondo i benchmark internazionali (ICAO, ACI), esse rappresentano

generalmente una quota compresa tra il 5% e il 15% delle emissioni totali aeroportuali (escludendo il ciclo di volo).

Dal punto di vista gestionale, queste emissioni sono le più facilmente riducibili, poiché direttamente controllabili dall'operatore aeroportuale. Interventi tipici includono l'elettrificazione delle flotte di terra, la sostituzione dei combustibili fossili con biocarburanti e il miglioramento dell'efficienza dei sistemi energetici interni.

– Scope 2: emissioni indirette legate all'energia elettrica acquistata.

Questa categoria è spesso dominante per quanto riguarda le operazioni di terminal, in particolare per aeroporti ad alta intensità di traffico. I consumi elettrici sono legati principalmente ai sistemi HVAC, che possono rappresentare fino al 40–60% dei consumi energetici di un terminal, l'illuminazione e i sistemi di sicurezza e IT.

La riduzione delle emissioni Scope 2 può avvenire attraverso, l'autoproduzione da fonti rinnovabili o l'acquisto di energia certificata (Garanzie d'Origine).

È importante sottolineare che il fattore emissivo dell'energia elettrica dipende dal mix nazionale, rendendo il contesto italiano (in progressiva decarbonizzazione) particolarmente rilevante.

– Scope 3: emissioni indirette connesse ai voli degli aeromobili, trasporto merci, forniture e gestione dei rifiuti.

Questa categoria rappresenta la quota nettamente prevalente delle emissioni associate al sistema aeroportuale (fino al 90–95% includendo il ciclo LTO e cruise degli aeromobili).

Essa include le emissioni degli aeromobili (Landing and Take-Off cycle), i trasporti di accesso (passeggeri e dipendenti) e la supply chain aeroportuale.

La complessità di gestione deriva dal fatto che tali emissioni non sono direttamente controllate dal gestore aeroportuale, ma richiedono politiche collaborative ad esempio gli incentivi all'uso di SAF, elettrificazione dei mezzi di accesso e ottimizzazione operativa.

- **Stima del contributo relativo di ciascun ambito operativo e identificazione delle aree prioritarie per interventi di mitigazione:**

Questa fase è fondamentale per costruire una mappa delle emissioni (emission inventory), che consente di quantificare il peso percentuale di ciascuna fonte, individuare le cosiddette hotspot emissive e allocare in modo efficiente le risorse di investimento.

Ad esempio, nei grandi hub europei, le emissioni Scope 3 dominano il totale, ma interventi su Scope 1 e 2 possono comunque generare benefici immediati e fungere da leva reputazionale e regolatoria.

Valutazione economico-finanziaria degli interventi

- **Strumenti di capital budgeting:**

$$NPV = \sum_{t=0}^{T} \frac{CF_t}{(1+r)^t} - CAPEX$$

$$\sum_{t=0}^{T} \frac{CF_t}{(1+IRR)^t} - CAPEX = 0$$

$$PB = \min\left(t : \sum_{i=0}^{t} \frac{CF_i}{(1+r)^i} \geq CAPEX\right)$$

Queste formule costituiscono il nucleo della valutazione economica e meritano un'interpretazione approfondita:

- NPV (Net Present Value)

  L'NPV misura il valore attuale netto dei flussi di cassa futuri generati dall'investimento.

  Ogni flusso CFt viene attualizzato tramite il tasso r (costo del capitale), che riflette il rischio del progetto, il costo opportunità del capitale, le condizioni di mercato.

  Un NPV positivo indica che il progetto genera valore economico netto, rendendolo teoricamente accettabile.

- IRR (Internal Rate of Return)

  L'IRR rappresenta il tasso di rendimento che rende nullo l'NPV.

  È particolarmente utile per confrontare progetti alternativi, valutare la redditività relativa rispetto al costo del capitale.

  Tuttavia, presenta limiti in presenza di flussi non convenzionali o multipli cambi di segno.

- PB (Payback Period)

  Il Payback Period misura il tempo necessario per recuperare l'investimento iniziale.

  Pur essendo un indicatore semplice, è molto utilizzato in ambito industriale per valutare il rischio di liquidità e esposizione temporale del capitale.

- **Analisi di sensitività rispetto a variabili critiche:**

  Le principali variabili considerate includono il prezzo dell'energia (fortemente volatile negli ultimi anni), costo dei SAF (attualmente 2–4 volte superiore al jet fuel), incentivi pubblici e tasso di adozione tecnologica.

  Questa analisi consente di comprendere quanto i risultati economici siano robusti rispetto a scenari incerti.

1.3 Domande di ricerca

Quali sono le principali fonti di emissione aeroportuale?

L'identificazione delle principali fonti di emissione rappresenta un passaggio preliminare fondamentale per qualsiasi strategia di decarbonizzazione, in quanto consente di costruire una base conoscitiva solida su cui impostare interventi mirati ed efficienti. In ambito aeroportuale, tale analisi viene generalmente condotta secondo la classificazione Scope 1, Scope 2 e Scope 3 del GHG Protocol, che permette di distinguere le emissioni in funzione del livello di controllo esercitato dall'operatore aeroportuale.

Le emissioni Scope 1, ovvero quelle dirette, derivano principalmente dalla combustione di carburanti fossili all'interno del perimetro aeroportuale. Tra le fonti più rilevanti rientrano i mezzi di supporto a terra (Ground Support Equipment – GSE), spesso alimentati a diesel, i sistemi di generazione energetica autonoma e gli impianti di riscaldamento tradizionali.

Secondo studi di settore (ICAO, ACI), queste emissioni rappresentano una quota relativamente contenuta del totale (tipicamente inferiore al 15%), ma risultano strategicamente rilevanti perché direttamente controllabili e quindi immediatamente riducibili attraverso interventi tecnologici mirati, come l'elettrificazione delle flotte o l'introduzione di carburanti alternativi.

Le emissioni Scope 2 sono associate al consumo di energia elettrica acquistata. Nei grandi aeroporti, tali emissioni risultano fortemente influenzate dall'intensità energetica dei terminal, che costituiscono infrastrutture ad elevato fabbisogno energetico continuo. In particolare, sistemi come HVAC, illuminazione e infrastrutture IT possono rappresentare la componente predominante dei consumi.

Secondo benchmark europei, il consumo energetico per passeggero può variare significativamente (da circa 3 a oltre 10 kWh/passeggero) in funzione della dimensione dello scalo e del livello di efficienza energetica. Questo evidenzia l'importanza di analizzare tali emissioni non solo in termini assoluti, ma anche tramite indicatori normalizzati.

Le emissioni Scope 3 costituiscono la componente più rilevante e complessa del sistema aeroportuale. Esse includono le emissioni degli aeromobili durante le fasi di atterraggio e decollo (LTO cycle), le emissioni dei voli in crociera, i trasporti di accesso e uscita dall'aeroporto e supply chain e attività dei fornitori.

Secondo le analisi dell'IPCC e di ICAO, queste emissioni possono rappresentare oltre il 90% dell'impatto climatico complessivo associato all'attività aeroportuale. In particolare, il contributo degli aeromobili domina nettamente il totale, rendendo evidente come la decarbonizzazione aeroportuale non possa essere limitata al solo perimetro infrastrutturale, ma debba coinvolgere l'intero ecosistema del trasporto aereo.

L'analisi delle fonti emissive mira quindi a quantificare il contributo relativo di ciascun processo operativo, individuare le principali aree energivore (terminal, flotte di terra, operazioni di volo) e definire priorità di intervento basate su criteri di efficacia e fattibilità.

Questo approccio consente di identificare le cosiddette "hotspot emissive", ovvero i punti critici del sistema su cui concentrare gli investimenti per massimizzare la

riduzione delle emissioni a parità di risorse disponibili.

Quali tecnologie e strategie sono più efficaci nel ridurre le emissioni?
L'individuazione delle tecnologie più efficaci richiede un'analisi comparativa tra diverse tipologie di intervento, che possono essere classificate in: interventi infrastrutturali ad esempio l'efficientamento energetico, interventi energetici con l'ultilizzo di fonti rinnovabili e interventi operativi come l'ottimizzazione delle procedure aeroportuali.

La valutazione dell'efficacia ambientale di tali interventi si basa sulla seguente relazione:

$$\Delta CO_2 = CO2_{baseline} - CO2_{post-intervento}$$

Questa formula rappresenta uno strumento fondamentale per la quantificazione del beneficio ambientale, in quanto consente di confrontare due scenari. Uno scenario di riferimento definito come "baseline", che rappresenta l'assetto operativo attuale e uno scenario "post-intervento", che incorpora le tecnologie o strategie implementate.

La differenza tra i due valori fornisce la riduzione assoluta delle emissioni di CO2, che può essere ulteriormente analizzata attraverso indicatori relativi, quali emissioni per passeggero, emissioni per tonnellata di merce ed emissioni per movimento aereo.

Questa normalizzazione è particolarmente importante in contesti caratterizzati da crescita del traffico, come quello aeroportuale italiano, dove una riduzione assoluta potrebbe essere compensata da un aumento dei volumi operativi.

Dal punto di vista tecnologico, le principali soluzioni includono l'efficientamento energetico, con riduzioni potenziali fino al 20–40% dei consumi nei terminal, energie rinnovabili, con possibilità di copertura significativa del fabbisogno energetico e l'utilizzo di Sustainable Aviation Fuels (SAF), che secondo l'IPCC possono ridurre le emissioni lifecycle fino al 70–80%. Tra le soluzioni si include l'elettrificazione dei mezzi di terra, già oggi tecnologicamente matura.

La valutazione dell'efficacia non può tuttavia limitarsi alla sola dimensione ambientale, ma deve includere i costi di investimento, i tempi di implementazione e la compatibilità con le infrastrutture esistenti.

In questo senso, l'analisi delle strategie più efficaci si configura come un problema di ottimizzazione multi-obiettivo, in cui è necessario bilanciare benefici ambientali e sostenibilità economica.

Gli investimenti in sostenibilità sono economicamente vantaggiosi?
La valutazione della convenienza economica degli investimenti rappresenta un elemento centrale del processo decisionale, soprattutto in un settore ad alta intensità di capitale come quello aeroportuale. A tal fine, vengono utilizzati strumenti di capital budgeting quali NPV, IRR e Payback Period, già introdotti nel paragrafo precedente.

L'applicazione di tali modelli consente di valutare la redditività degli investimenti, confrontare alternative tecnologiche e analizzare il rischio associato ai flussi di cassa futuri.

In particolare, l'analisi considera scenari alternativi uno moderato e uno ambizioso per tener conto delle principali fonti di incertezza. Tra queste citiamo la volatilità

dei prezzi energetici, accentuata nel contesto europeo recente, l'evoluzione del costo dei SAF, attualmente significativamente superiore ai combustibili convenzionali e l'introduzione di meccanismi di carbon pricing conosciuti meglio come EU ETS.

Dal punto di vista empirico, numerosi studi evidenziano che interventi di efficientamento energetico presentano generalmente NPV positivo e tempi di ritorno brevi. Le tecnologie emergenti come l'idrogeno presentano elevata incertezza e orizzonti temporali più lunghi, mentre l'inclusione di incentivi pubblici può modificare significativamente la convenienza economica.

L'analisi economica si configura quindi come uno strumento essenziale per prioritizzare gli investimenti, ridurre il rischio decisionale, supportare strategie di lungo periodo coerenti con gli obiettivi di decarbonizzazione.

Qual è il ruolo delle politiche pubbliche nazionali ed europee nel sostenere la decarbonizzazione?

Le politiche pubbliche rappresentano un fattore determinante per la transizione verso sistemi aeroportuali a basse emissioni, in quanto influenzano sia il contesto normativo sia le condizioni economiche degli investimenti.

A livello europeo, strumenti come il pacchetto Fit for 55, il sistema EU ETS, le direttive su energie rinnovabili e carburanti sostenibili introducono vincoli e incentivi che modificano in modo significativo la struttura dei costi del settore.

In particolare il carbon pricing aumenta il costo relativo delle tecnologie ad alta intensità emissiva, gli obblighi di utilizzo di SAF stimolano la domanda di carburanti sostenibili, i programmi di finanziamento, come il PNRR, riducono le barriere all'investimento.

A livello nazionale, strumenti come il PNIEC e i meccanismi di incentivazione fiscale contribuiscono ad orientare gli investimenti privati, ridurre il costo del capitale e accelerare l'adozione di tecnologie innovative.

L'analisi si concentra quindi sulla coerenza tra politiche pubbliche e strategie industriali, valutando l'efficacia degli strumenti esistenti, eventuali gap regolatori, le opportunità di miglioramento del quadro normativo.

In questo contesto, le politiche pubbliche non sono solo un vincolo, ma rappresentano una leva strategica per rendere economicamente sostenibile la decarbonizzazione, soprattutto nei casi in cui le tecnologie presentano ancora costi elevati o livelli di maturità limitati.

1.4 Metodologia

La metodologia adottata segue un approccio mixed-methods integrato, combinando strumenti quantitativi e qualitativi, con l'obiettivo di garantire robustezza analitica, replicabilità e applicabilità industriale. L'integrazione di dati empirici e modelli teorici consente di ottenere risultati solidi e utili per supportare decisioni strategiche nel contesto aeroportuale.

In particolare, l'approccio metodologico si fonda sull'idea che la decarbonizzazione del settore aeroportuale non possa essere analizzata attraverso una singola dimensione di studio, ma richieda una valutazione sistemica che tenga conto simultaneamente di variabili energetiche, economiche, operative e regolatorie. L'utilizzo

combinato di analisi quantitativa (modelli economico-finanziari, simulazioni, indicatori ambientali) e qualitativa (analisi di policy, benchmarking, best practices) permette di superare i limiti dei singoli approcci, offrendo una visione più completa e realistica.

Questo tipo di metodologia è coerente con quanto evidenziato nei report di organismi internazionali come ENEA e IEA, che sottolineano come le strategie di transizione energetica richiedano strumenti analitici multidisciplinari in grado di integrare dimensioni tecnologiche ed economiche.

1.4.1 Revisione della letteratura

Analisi di fonti scientifiche peer-reviewed su sistemi aeroportuali, decarbonizzazione e energie rinnovabili:

Questa fase consente di costruire un quadro teorico di riferimento e di identificare le principali variabili di interesse.

L'analisi della letteratura rappresenta un passaggio fondamentale per definire il perimetro teorico entro cui si inserisce la ricerca. In particolare, vengono analizzati contributi accademici relativi a modelli di gestione energetica aeroportuale, strategie di riduzione delle emissioni nel settore aviation e tecnologie per la produzione e l'utilizzo di energia rinnovabile in contesti infrastrutturali complessi.

La letteratura evidenzia come gli aeroporti siano responsabili di consumi energetici rilevanti, soprattutto nei terminal passeggeri, dove sistemi HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) possono rappresentare fino al 40–60% dei consumi totali, secondo studi ENEA. Questo dato è particolarmente rilevante per orientare le successive analisi sugli interventi di efficientamento energetico.

Benchmarking internazionale tramite report ICAO, ENAC, ENEA, EASA e IEA:

Il confronto con esperienze internazionali permette di individuare modelli di successo e best practices replicabili nel contesto italiano.

Il benchmarking consente di confrontare le performance ambientali e operative degli aeroporti italiani con quelle di altri contesti internazionali. I report di ICAO e IEA evidenziano, ad esempio, che gli aeroporti europei più avanzati hanno già raggiunto livelli elevati di carbon neutrality per le emissioni Scope 1 e 2. Inoltre, l'adozione di energia rinnovabile onsite può coprire fino al 20–40% del fabbisogno energetico aeroportuale, a seconda della disponibilità di superficie e condizioni climatiche.

Questi dati rappresentano un riferimento concreto per valutare il gap tecnologico e identificare traiettorie di miglioramento per il sistema aeroportuale italiano.

Identificazione di best practices aeroportuali, con attenzione a tecnologie mature e replicabili in Italia:

L'obiettivo è selezionare soluzioni realistiche, evitando approcci puramente teorici o non ancora implementabili su larga scala.

La selezione delle best practices si basa su criteri di maturità tecnologica (Technology Readiness Level elevato), sostenibilità economica e compatibilità con il contesto normativo italiano.

Ad esempio, l'elettrificazione dei Ground Support Equipment (GSE) è considerata una soluzione già pienamente implementabile, mentre l'utilizzo dell'idrogeno, pur promettente, presenta ancora barriere infrastrutturali e di costo.

1.4.2 Raccolta e analisi dei dati

Dati ufficiali su traffico passeggeri e merci (ENAC 2025):

Questi dati costituiscono la base per la costruzione degli indicatori di performance.

I dati ENAC rappresentano una fonte primaria per la quantificazione delle attività aeroportuali. Il traffico passeggeri e cargo è utilizzato per costruire indicatori normalizzati, come emissioni per passeggero, consumi energetici per movimento e intensità carbonica per tonnellata di merce trasportata.

La normalizzazione è essenziale perché consente di confrontare aeroporti con scale operative molto diverse, evitando distorsioni legate alla dimensione assoluta.

Consumi energetici, emissioni storiche e indicatori ambientali dei principali aeroporti:

L'analisi storica consente di individuare trend e valutare l'efficacia delle politiche già implementate.

L'analisi dei dati storici permette di identificare trend di crescita o riduzione delle emissioni, correlazioni tra traffico e consumi energetici ed infine, effetti di interventi già implementati (es. introduzione LED, impianti fotovoltaici).

Secondo dati ENEA, interventi di efficientamento energetico possono ridurre i consumi dei terminal fino al 20–30%, evidenziando un significativo potenziale di miglioramento.

Costi CAPEX e OPEX delle tecnologie green (fotovoltaico, sistemi elettrici, SAF, idrogeno):

Queste informazioni sono fondamentali per la modellazione economica.

La distinzione tra CAPEX (costi iniziali di investimento) e OPEX (costi operativi) è cruciale per valutare la sostenibilità economica delle tecnologie. Ad esempio il fotovoltaico presenta elevati CAPEX ma bassi OPEX mentre i SAF presentano costi operativi elevati (fino a 2–4 volte il carburante tradizionale secondo IEA).

Queste differenze influenzano direttamente i risultati delle analisi economico-finanziarie.

Normalizzazione dei dati per ottenere indicatori comparabili tra aeroporti di dimensioni e traffico differente:

Questo passaggio è essenziale per garantire la comparabilità dei risultati e l'applicabilità delle conclusioni.

La normalizzazione avviene attraverso indicatori come kWh/passeggero, tCO_2/movimento, kWh/m^2 di terminal.

Questi indicatori consentono di individuare inefficienze e benchmark di riferimento.

1.4.3 Modellazione economico-finanziaria

Applicazione di strumenti di capital budgeting:

$$NPV = \sum_{t=0}^{T} \frac{CF_t}{(1+r)^t} - CAPEX$$

$$\sum_{t=0}^{T} \frac{CF_t}{(1+IRR)^t} - CAPEX = 0$$

$$PB = \min\left(t : \sum_{i=0}^{t} \frac{CF_i}{(1+r)^i} \geq CAPEX\right)$$

L'applicazione congiunta di questi indicatori consente di ottenere una valutazione completa degli investimenti, considerando sia la creazione di valore nel lungo periodo sia il rischio e la liquidità nel breve periodo.

In particolare, ogni componente della formula NPV assume un significato economico preciso:

- CFt (Cash Flow): rappresenta i flussi di cassa netti generati dall'investimento in ciascun periodo t, includendo risparmi energetici, incentivi e costi operativi evitati
- r (tasso di sconto): riflette il costo del capitale e il rischio dell'investimento
- CAPEX: rappresenta l'investimento iniziale necessario per implementare la tecnologia

L'attualizzazione dei flussi di cassa consente di confrontare valori economici distribuiti nel tempo, tenendo conto del principio del valore temporale del denaro. Un NPV positivo indica che i benefici attualizzati superano i costi iniziali, rendendo l'investimento economicamente conveniente.

L'IRR, invece, permette di identificare il rendimento percentuale implicito del progetto. Questo indicatore è particolarmente utile per confrontare diverse alternative di investimento: un progetto è considerato accettabile se l'IRR supera il costo del capitale.

Il Payback Period (PB) introduce una dimensione temporale più immediata, indicando il numero di anni necessari per recuperare l'investimento iniziale. Sebbene non consideri pienamente il valore temporale del denaro, è un indicatore molto utilizzato in contesti industriali per valutare il rischio e la liquidità.

Analisi di sensitività multivariata: variazioni prezzo energia, costo SAF, livello elettrificazione, incentivi pubblici:

Questa analisi permette di identificare le variabili più critiche e di valutare la stabilità dei risultati.

L'analisi di sensitività consente di simulare scenari alternativi modificando le variabili chiave. Ad esempio un aumento del prezzo dell'energia rende più conveniente l'investimento in efficienza energetica e una riduzione del costo dei SAF migliora la sostenibilità economica delle strategie di decarbonizzazione dei voli.

Questo approccio è fondamentale in un contesto caratterizzato da elevata incertezza e volatilità dei mercati energetici.

Valutazione del rischio e simulazioni probabilistiche sui flussi di cassa:
L'utilizzo di tecniche probabilistiche consente di incorporare l'incertezza nelle valutazioni economiche.

L'introduzione di simulazioni (ad esempio Monte Carlo) permette di modellare la variabilità delle principali variabili economiche, ottenere distribuzioni di probabilità degli indicatori (NPV, IRR) e valutare il rischio di non convenienza economica.

Questo approccio migliora significativamente la robustezza delle decisioni di investimento.

1.4.4 Scenario analysis e simulazioni

Proiezioni 2030–2050 secondo due scenari principali:

1. Moderato: 50% SAF, 70% elettrificazione veicoli di terra e sistemi di supporto.

   Questo scenario rappresenta una traiettoria realistica basata su tecnologie già disponibili o in fase avanzata di sviluppo.

   In questo scenario, la riduzione delle emissioni deriva principalmente dalla sostituzione parziale dei carburanti fossili con SAF, dall'elettrificazione progressiva delle operazioni a terra e dal miglioramento dell'efficienza energetica.

   Secondo IEA, i SAF possono ridurre le emissioni fino al 70–80% su base lifecycle, rendendo questo scenario tecnicamente plausibile nel medio periodo.

2. Ambizioso: Net-Zero, integrazione idrogeno e microgrid elettriche per terminal e infrastrutture.

   Questo scenario ipotizza una trasformazione più radicale del sistema aeroportuale, con l'adozione di tecnologie emergenti.

   In questo caso, il sistema aeroportuale evolve verso la produzione energetica decentralizzata (microgrid), l'utilizzo di idrogeno per aviazione e servizi a terra e la completa integrazione delle rinnovabili.

   Tuttavia, questo scenario presenta maggiori incertezze legate a costi, infrastrutture e regolamentazione. Vengono inoltre effettuate simulazioni integrate per stimare la riduzione percentuale di emissioni $\Delta CO_2\%$, ROI e Payback Period modificati per scenario e il Trade-off economico-ambientale per strategie di intervento

Le simulazioni permettono di quantificare la riduzione delle emissioni utilizzando indicatori derivati dalla formula:

$$\Delta CO_2 = CO_{2baseline} - CO_{2post-intervento}$$

Questa relazione consente di valutare in modo diretto l'impatto ambientale degli interventi. La successiva normalizzazione (ad esempio per passeggero) permette di confrontare scenari diversi e identificare le strategie più efficienti.

Il confronto tra indicatori economici (NPV, IRR, PB) e ambientali (ΔCO_2) consente di analizzare il trade-off tra sostenibilità economica e ambientale, evidenziando le soluzioni che massimizzano entrambi gli obiettivi.

In definitiva, questa fase rappresenta il punto di sintesi dell'intero approccio metodologico, in cui dati, modelli e scenari vengono integrati per supportare decisioni strategiche informate nel processo di decarbonizzazione degli aeroporti.

Capitolo 2

Il settore aeroportuale

2.1 Struttura e caratteristiche del sistema aeroportuale italiano

Il sistema aeroportuale italiano rappresenta una componente infrastrutturale strategica di primaria rilevanza per il funzionamento del sistema economico nazionale, configurandosi come un nodo essenziale nei processi di mobilità internazionale, integrazione territoriale e sviluppo delle relazioni commerciali. In un contesto di crescente globalizzazione, gli aeroporti assumono un ruolo sempre più centrale nel garantire la connettività tra mercati geografici distanti, favorendo non solo il turismo, ma anche l'internazionalizzazione delle imprese e l'attrazione di investimenti esteri.

Dal punto di vista macroeconomico, secondo i dati ENAC (2025), il traffico aereo in Italia ha ormai superato i livelli pre-pandemici, con una crescita trainata sia dalla domanda turistica internazionale sia dalla ripresa dei viaggi d'affari. Questo andamento conferma il ruolo del trasporto aereo come infrastruttura abilitante per la competitività del sistema Paese, soprattutto in un contesto europeo caratterizzato da elevata integrazione economica e mobilità transfrontaliera.

In particolare, la connettività aerea rappresenta un fattore abilitante per l'integrazione dell'economia italiana nelle catene globali del valore, permettendo una riduzione significativa dei tempi di trasporto rispetto ad altre modalità. Questo aspetto è particolarmente rilevante per un sistema produttivo come quello italiano, caratterizzato da una forte vocazione all'export e da una presenza significativa di piccole e medie imprese che necessitano di collegamenti rapidi con i mercati internazionali.

L'accessibilità garantita dagli aeroporti incide direttamente anche sulla competitività territoriale: le regioni meglio collegate tendono ad attrarre maggiori investimenti e flussi turistici, generando effetti moltiplicativi sull'economia locale. In questo senso, il sistema aeroportuale svolge anche una funzione di riequilibrio territoriale, sebbene, come si vedrà, tale funzione sia limitata dalla forte concentrazione del traffico.

Esso svolge, infatti, un ruolo determinante non solo nel trasporto passeggeri, ma anche nella gestione dei flussi cargo ad alto valore aggiunto, contribuendo in maniera significativa alla competitività del Paese nelle catene globali del valore. In particolare, il trasporto aereo risulta cruciale per merci ad elevata deperibilità o

valore unitario, come prodotti farmaceutici, componenti elettronici e beni di lusso, settori nei quali l'Italia presenta importanti specializzazioni produttive.

Secondo le analisi ENAC, il traffico cargo in Italia è fortemente concentrato in pochi aeroporti del Nord, evidenziando una correlazione diretta con le aree a maggiore densità industriale. Questo fenomeno rafforza il ruolo degli aeroporti come nodi logistici integrati, nei quali convergono diverse modalità di trasporto (gomma, ferrovia, aereo), contribuendo all'efficienza complessiva della supply chain.

Dal punto di vista economico, il segmento cargo presenta caratteristiche differenti rispetto al traffico passeggeri, in quanto è meno sensibile alla stagionalità turistica e più correlato agli andamenti macroeconomici e industriali. Ciò implica che gli aeroporti con forte vocazione cargo, come quelli del Nord Italia, assumono un ruolo strategico non solo per il trasporto ma anche per la logistica integrata, fungendo da hub intermodali con connessioni ferroviarie e autostradali.

Dal punto di vista sistemico, il network aeroportuale italiano può essere interpretato come una rete complessa caratterizzata da una struttura fortemente eterogenea e gerarchica. Tale eterogeneità si manifesta in termini di dimensione degli scali, volume di traffico, livello di infrastrutturazione e funzioni operative svolte. Le differenze tra aeroporti si riflettono anche nei modelli di business adottati, che possono variare da scali orientati al traffico low-cost a hub intercontinentali con elevata integrazione logistica.

Questa eterogeneità implica anche differenti livelli di efficienza operativa e di intensità energetica: gli aeroporti di grandi dimensioni, pur beneficiando di economie di scala, presentano fabbisogni energetici molto elevati, mentre gli scali regionali, pur essendo meno energivori, possono risultare meno efficienti in termini di utilizzo delle infrastrutture. In particolare, gli hub principali operano spesso vicino ai limiti di capacità, mentre molti aeroporti minori presentano livelli di utilizzo inferiori al potenziale.

Secondo i dati più recenti forniti da ENAC (2025), il sistema comprende circa 100 aeroporti operativi, dei quali poco più di 30 concentrano la quasi totalità del traffico commerciale nazionale, evidenziando una distribuzione fortemente asimmetrica. In termini quantitativi, oltre il 90% del traffico passeggeri si concentra in un numero limitato di scali, confermando una struttura fortemente polarizzata.

Questa distribuzione asimmetrica può essere interpretata anche alla luce delle dinamiche di domanda, che tendono a concentrarsi nei principali poli economici e turistici del Paese. Inoltre, la presenza di compagnie aeree low-cost ha contribuito a rafforzare alcuni aeroporti secondari, modificando parzialmente la struttura gerarchica tradizionale e introducendo dinamiche competitive basate sul costo e sull'accessibilità.

Questa configurazione è coerente con il paradigma organizzativo hub-and-spoke, ampiamente diffuso nel settore del trasporto aereo, in cui pochi aeroporti principali (hub) fungono da nodi di smistamento del traffico, mentre gli scali secondari operano come nodi periferici (spoke), alimentando i flussi verso gli hub principali. Tale modello consente di ottimizzare l'utilizzo delle flotte e di massimizzare i coefficienti di riempimento degli aeromobili, riducendo i costi medi per passeggero trasportato.

Dal punto di vista operativo, il modello hub-and-spoke permette anche una maggiore frequenza dei collegamenti sulle rotte principali e una migliore gestione della

domanda, grazie alla possibilità di aggregare passeggeri provenienti da diverse origini su un unico volo di lungo raggio. Esso implica una maggiore complessità nella gestione delle coincidenze e una dipendenza critica dai nodi centrali.

Infatti, questa struttura comporta anche alcune criticità, tra cui una maggiore vulnerabilità a shock sistemici e fenomeni di congestione nei nodi centrali, con potenziali ripercussioni sia sull'efficienza operativa sia sull'impatto ambientale. La congestione aeroportuale, infatti, può determinare ritardi, aumento dei tempi di rullaggio e conseguente incremento delle emissioni.

Dal punto di vista ambientale, tali inefficienze si traducono in un aumento delle emissioni di CO_2 per unità di traffico, evidenziando come la gestione della capacità aeroportuale rappresenti un elemento chiave nelle strategie di decarbonizzazione. In particolare, le fasi di taxiing e attesa a terra sono tra le più inefficienti in termini energetici.

Il sistema aeroportuale italiano è costituito da circa 100 scali operativi, di cui circa 30 gestiti in maniera significativa per traffico passeggeri e cargo (ENAC, 2025). Gli aeroporti italiani si distinguono per hub primari, hub secondari e scali regionali:

Tipo di aeroporto	Esempi principali	Traffico passeggeri 2024	Ruolo strategico
Hub primario	Roma Fiumicino, Milano Malpensa	43M, 21M	Collegamenti internazionali
Hub secondario	Venezia, Napoli, Bologna	10–13M	Collegamenti nazionali
Scali regionali	Pisa, Bari, Cagliari	2–4M	Accesso locale

Tabella 2.1: Classificazione aeroporti italiani (Fonte: ENAC, 2025; elaborazione propria)

La Tabella 2.1 consente di evidenziare in modo sintetico la struttura gerarchica del sistema aeroportuale italiano. Gli hub primari, come Roma Fiumicino e Milano Malpensa, si caratterizzano per volumi di traffico significativamente superiori rispetto alle altre categorie e per un ruolo centrale nei collegamenti intercontinentali.

Gli hub secondari svolgono invece una funzione di supporto, concentrandosi principalmente su rotte europee e contribuendo alla distribuzione del traffico all'interno del continente. Gli scali regionali, infine, garantiscono l'accessibilità territoriale, soprattutto in aree periferiche o insulari, svolgendo una funzione essenziale di coesione economica e sociale.

Dal punto di vista teorico, la distribuzione del traffico può essere modellata attraverso leggi di tipo power-law, tipiche dei sistemi complessi:

$$P_i \propto i^{-\gamma}$$

dove P_i rappresenta il traffico associato all'aeroporto di rango i, mentre γ costituisce il parametro di concentrazione.

Questa formulazione è particolarmente utile per descrivere sistemi caratterizzati da forte disuguaglianza nella distribuzione delle risorse o delle attività. Nel caso aeroportuale, essa implica che il traffico decresce rapidamente all'aumentare del rango dell'aeroporto, evidenziando una struttura "a coda lunga".

La classificazione funzionale del sistema aeroportuale italiano può essere articolata in tre macro-categorie:

1. Hub primari

2. Hub secondari

3. Scali regionali

Per una valutazione quantitativa della rilevanza relativa dei singoli aeroporti, è possibile definire un indicatore sintetico:

$$I_i = \alpha \cdot \frac{P_i}{P_{tot}} \, \beta \cdot \frac{M_i}{M_{tot}}$$

Questo indicatore rappresenta una misura composita della centralità di un aeroporto all'interno del sistema. La componente legata ai passeggeri (P_i/P_{tot}) riflette il peso della domanda, mentre quella relativa ai movimenti (M_i/M_{tot}) cattura l'intensità operativa e l'utilizzo delle infrastrutture.

La concentrazione del traffico può essere analizzata mediante l'indice di Herfindahl-Hirschman:

$$HHI = \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{P_i}{P_{tot}} \right)^2$$

L'HHI fornisce una misura sintetica della concentrazione del mercato: nel caso italiano, valori relativamente elevati indicano una forte dipendenza da pochi grandi hub, con implicazioni rilevanti sia in termini di resilienza del sistema sia di pianificazione infrastrutturale.

Dal punto di vista energetico, il fabbisogno complessivo può essere espresso come:

$$E_{tot} = E_{terminal} + E_{airside} + E_{landside}$$

Questa equazione consente di scomporre i consumi energetici in tre macro-componenti: terminal, airside e landside. Tale distinzione è fondamentale per identificare le aree di intervento più efficaci in termini di efficienza energetica.

In particolare:

$$E_{terminal} = E_{HVAC} + E_{lighting} + E_{ICT}$$

La componente E_{HVAC}, che rappresenta fino al 60% dei consumi del terminal, evidenzia come gli interventi sulla climatizzazione (ad esempio mediante sistemi ad alta efficienza o fonti rinnovabili) possano generare i maggiori benefici in termini di riduzione delle emissioni.

L'illuminazione e i sistemi ICT, sebbene meno energivori, offrono comunque opportunità significative di efficientamento, ad esempio attraverso l'adozione di tecnologie LED e sistemi di gestione intelligente dell'energia.

Nel complesso, l'analisi energetica del sistema aeroportuale evidenzia come la decarbonizzazione richieda un approccio integrato, che tenga conto delle diverse componenti operative e delle loro interazioni.

2.2 Stakeholder del sistema aeroportuale

Il sistema aeroportuale si caratterizza per una struttura multi-attore, nella quale la creazione di valore e la gestione delle esternalità ambientali dipendono dall'interazione tra diversi stakeholder. Il funzionamento di un aeroporto coinvolge una rete complessa di stakeholder, sia pubblici sia privati, con ruoli distinti ma interdipendenti.

Stakeholder	**Ruolo principale**
Gestore aeroportuale	Pianificazione infrastrutture, gestione terminal e piste
Compagnie aeree	Operazioni di volo, programmazione rotte
Autorità di regolazione (ENAC, ENEA, GSE)	Normativa e incentivi
Fornitori energetici	Energia elettrica e carburanti
Comunità locali e ONG	Monitoraggio impatti ambientali

Tabella 2.2: Principali stakeholder e impatto sulla decarbonizzazione (Fonti: ENAC, 2025; EASA, 2024; elaborazione propria)

La Tabella 2.2 sintetizza la struttura del sistema aeroportuale evidenziando come ciascun attore contribuisca in modo specifico sia alla generazione di valore economico sia alla produzione di emissioni. In particolare, emerge chiaramente come la responsabilità delle emissioni sia distribuita lungo l'intera catena del valore e non limitata al solo gestore aeroportuale. Questo aspetto è centrale nelle politiche di decarbonizzazione, che richiedono un approccio sistemico e coordinato.

Secondo le analisi di ENAC (2025) ed EASA (2024), oltre il 70–80% delle emissioni complessive associate al sistema aeroportuale deriva dalle operazioni di volo (Scope 3), mentre le emissioni direttamente controllate dai gestori aeroportuali (Scope 1 e Scope 2) rappresentano una quota significativamente inferiore. Ciò implica che, pur essendo i gestori responsabili dell'infrastruttura, il contributo maggiore alla decarbonizzazione dipende dalla capacità di coordinamento con le compagnie aeree e gli altri stakeholder.

Il sistema aeroportuale italiano si caratterizza per la presenza di una struttura multi-attore, nella quale la creazione di valore economico e la gestione delle esternalità ambientali derivanti dalle attività aeroportuali dipendono strettamente dall'interazione sinergica tra diversi stakeholder pubblici e privati. Tale interdipendenza genera complessità sia nella governance sia nell'implementazione di politiche ambientali, richiedendo strumenti di coordinamento avanzati e meccanismi di incentivazione adeguati.

Gestore aeroportuale: responsabile della pianificazione delle infrastrutture, della gestione dei terminal e delle piste. Il gestore esercita un ruolo cruciale nel controllo diretto delle emissioni Scope 1 e Scope 2, ossia quelle generate rispettivamente da fonti interne (combustione, veicoli di servizio) e dall'energia elettrica acquistata.

$$E_{tot} = E_{Scope1} + E_{Scope2} + E_{Scope3}$$

Questa relazione formalizza il bilancio complessivo delle emissioni associate all'aeroporto, evidenziando la suddivisione in tre categorie principali secondo il GHG Protocol. In particolare:

1. E_{Scope1} include le emissioni dirette, come quelle derivanti da generatori, mezzi di terra e sistemi di riscaldamento;

2. E_{Scope2} comprende le emissioni indirette legate al consumo di energia elettrica acquistata;

3. E_{Scope3} include tutte le altre emissioni indirette, tra cui quelle generate dalle operazioni delle compagnie aeree, dal trasporto passeggeri da e verso l'aeroporto e dalle attività dei fornitori.

Dal punto di vista gestionale, questa scomposizione è fondamentale perché consente di identificare le leve di intervento: mentre Scope 1 e Scope 2 sono direttamente controllabili, Scope 3 richiede strategie collaborative.

Compagnie aeree: principalmente responsabili delle emissioni Scope 3. Il loro contributo è predominante, in quanto le emissioni generate durante le fasi di volo rappresentano la quota maggiore dell'impatto ambientale del settore.

$$C = \frac{F}{RPK}$$

Questa formula definisce l'intensità energetica del trasporto aereo, esprimendo il consumo di carburante per unità di traffico passeggeri. Essa rappresenta un indicatore chiave di efficienza operativa: valori più bassi indicano un utilizzo più efficiente del carburante.

$$C = \frac{F}{ASK \cdot \frac{RPK}{ASK}}$$

La scomposizione dell'indice C consente di distinguere due componenti fondamentali come l'efficienza tecnica del velivolo (F/ASK), ovvero il consumo per posto offerto e il fattore di riempimento (ASK/RPK), che misura quanto efficacemente la capacità disponibile viene utilizzata.

Secondo EASA (2024), negli ultimi anni si è osservato un miglioramento dell'efficienza tecnica grazie all'introduzione di aeromobili di nuova generazione, mentre il load factor medio si è stabilizzato su valori elevati (oltre l'80%), contribuendo alla riduzione delle emissioni per passeggero. Tuttavia, ulteriori miglioramenti richiedono interventi sia tecnologici sia operativi.

Autorità di regolazione e istituzioni pubbliche (ENAC, ENEA, GSE): definiscono normative, incentivi e linee guida per la riduzione delle emissioni. Il loro ruolo è fondamentale nel creare un contesto regolatorio favorevole alla transizione energetica.

$$SAFshare = \frac{F_{SAF}}{F_{tot}}$$

Questo indicatore misura la quota di carburanti sostenibili (SAF) sul totale del carburante utilizzato. Secondo le linee guida europee, l'aumento progressivo del SAF rappresenta uno degli strumenti principali per la decarbonizzazione del trasporto aereo, con obiettivi crescenti nel tempo.

Dal punto di vista economico, tuttavia, il SAF presenta costi significativamente superiori rispetto ai carburanti tradizionali, rendendo necessari meccanismi di incentivazione e politiche di supporto per favorirne la diffusione.

Fornitori energetici e infrastrutture tecniche: forniscono elettricità e carburanti, influenzando direttamente le emissioni Scope 2. Il loro ruolo è particolarmente rilevante nel contesto della transizione energetica, in quanto la decarbonizzazione del mix energetico si riflette direttamente sulle emissioni degli aeroporti.

$$E_{self} = E_{PV} + E_{storage} - E_{losses}$$

Questa equazione descrive la produzione interna di energia, evidenziando il contributo delle fonti rinnovabili (in particolare il fotovoltaico) e dei sistemi di accumulo. La riduzione delle perdite di rete (E_{losses}) rappresenta un ulteriore elemento di efficienza.

Secondo ENAC (2025), diversi aeroporti italiani stanno investendo in impianti fotovoltaici e sistemi di accumulo per aumentare l'autosufficienza energetica, riducendo sia i costi operativi sia le emissioni. Questo approccio consente inoltre di migliorare la resilienza del sistema rispetto alle fluttuazioni dei prezzi dell'energia.

Comunità locali e ONG: monitorano gli impatti ambientali e sociali, influenzando decisioni strategiche come la localizzazione di nuove infrastrutture o l'adozione di tecnologie sostenibili. Il loro ruolo è diventato sempre più rilevante negli ultimi anni, anche alla luce della crescente attenzione verso le tematiche ambientali.

Le pressioni esercitate da questi stakeholder possono tradursi in vincoli normativi più stringenti o in richieste di compensazione ambientale, influenzando direttamente le strategie degli operatori aeroportuali. In particolare, le problematiche legate al rumore e alla qualità dell'aria rappresentano elementi critici nella pianificazione aeroportuale.

In sintesi, la governance aeroportuale si fonda su un modello integrato, in cui la collaborazione tra stakeholder è essenziale per ridurre le emissioni e ottimizzare la gestione energetica. La complessità del sistema richiede un approccio coordinato, in cui strumenti quantitativi, politiche pubbliche e innovazioni tecnologiche operano congiuntamente per raggiungere gli obiettivi di decarbonizzazione.

L'efficacia di tali strategie dipende dalla capacità di allineare gli incentivi economici e ambientali dei diversi attori, favorendo investimenti in tecnologie sostenibili e promuovendo modelli operativi più efficienti lungo l'intera catena del valore aeroportuale.

2.3 Evoluzione storica e tendenze recenti

L'evoluzione del traffico passeggeri e cargo nel sistema aeroportuale italiano rappresenta un elemento chiave per comprendere le dinamiche di sviluppo del settore e le implicazioni in termini di sostenibilità ambientale. Negli ultimi due decenni, il traffico aereo in Italia ha mostrato una crescita significativa, trainata da fattori quali la liberalizzazione del mercato, l'espansione delle compagnie low-cost e l'aumento della domanda turistica internazionale.

Secondo i dati ENAC (2025), il traffico passeggeri ha registrato un trend crescente fino al 2019, anno in cui è stato raggiunto un picco storico, seguito da una brusca contrazione nel periodo 2020–2021 a causa della pandemia da COVID-19. Successivamente, il settore ha mostrato una rapida capacità di recupero, con un ritorno ai livelli pre-crisi già nel 2023–2024, evidenziando una resilienza strutturale della domanda di trasporto aereo.

Per analizzare in modo quantitativo tali dinamiche, il tasso di crescita annuo composto (CAGR) rappresenta uno strumento fondamentale, in quanto consente di sintetizzare l'evoluzione del traffico su un determinato orizzonte temporale, tenendo conto degli effetti cumulativi della crescita.

$$CAGR = \left(\frac{P_t}{P_0}\right)^{\frac{1}{t}} - 1$$

dove P0 rappresenta il traffico iniziale e Pt il traffico finale.

Questa formula esprime il tasso di crescita medio annuo che, se applicato in modo costante, consente di passare dal valore iniziale P0 al valore finale Pt nell'arco di t anni. A differenza del tasso di crescita semplice, il CAGR tiene conto della capitalizzazione composta, risultando quindi particolarmente adatto per analizzare fenomeni economici caratterizzati da dinamiche non lineari.

Nel caso del sistema aeroportuale italiano, l'applicazione del CAGR consente di confrontare le performance di diversi scali o periodi temporali. Ad esempio, la crescita relativamente moderata di alcuni grandi aeroporti, come Milano Malpensa, riflette una fase di maturità del mercato, mentre tassi più elevati osservabili in aeroporti secondari possono essere interpretati come segnali di espansione o recupero di capacità inutilizzata.

Accanto al traffico passeggeri, il traffico cargo rappresenta un indicatore fondamentale per valutare il grado di integrazione del sistema economico nazionale nei flussi commerciali globali. A differenza del traffico passeggeri, il cargo è fortemente correlato agli andamenti macroeconomici e presenta una maggiore volatilità.

$$Cargo_t = \alpha \cdot GDP_t^{\beta}$$

Questa relazione esprime il traffico cargo come funzione del prodotto interno lordo (GDP), introducendo un parametro β che rappresenta l'elasticità del traffico rispetto alla crescita economica. Il fatto che β sia generalmente maggiore di 1 implica che il traffico cargo cresce più che proporzionalmente rispetto al PIL.

Dal punto di vista interpretativo, ciò significa che, in fasi di espansione economica, la domanda di trasporto aereo di merci aumenta in modo amplificato, riflettendo la crescente complessità delle catene globali del valore e la maggiore incidenza di beni ad alto valore aggiunto. Viceversa, nelle fasi recessive, il traffico cargo tende a contrarsi più rapidamente, evidenziando una maggiore sensibilità ai cicli economici.

Secondo ENAC (2025), questa relazione è particolarmente evidente nel contesto italiano, dove il traffico cargo è concentrato in aree ad alta intensità industriale e fortemente orientate all'export. Ciò rafforza il legame tra performance del settore aeroportuale e dinamiche macroeconomiche nazionali e internazionali.

Eventi straordinari, come la pandemia COVID-19, hanno provocato contrazioni significative del traffico passeggeri:

$$\Delta P \approx -60\%$$

Questa variazione percentuale evidenzia l'entità dello shock subito dal settore, che ha comportato una riduzione senza precedenti della domanda di trasporto aereo. Tale contrazione ha avuto effetti differenziati sui diversi segmenti: mentre il traffico passeggeri è crollato drasticamente, il traffico cargo ha mostrato una maggiore resilienza, sostenuto dalla necessità di trasportare beni essenziali e prodotti sanitari.

Dal punto di vista economico, questa dinamica ha messo in luce la vulnerabilità del modello di business aeroportuale, fortemente dipendente dai volumi di traffico passeggeri, e ha evidenziato la necessità di diversificazione delle fonti di ricavo.

Conseguentemente, gli indicatori di utilizzo degli aerei, come il load factor (LF), hanno subito una significativa riduzione:

$$LF = \frac{P}{S}$$

dove P è il numero di passeggeri trasportati e S la capacità disponibile in posti.

Il load factor rappresenta uno degli indicatori più rilevanti per valutare l'efficienza operativa del trasporto aereo, in quanto misura il grado di utilizzo della capacità offerta. Valori elevati indicano un utilizzo efficiente degli aeromobili, mentre valori bassi segnalano una sovracapacità o una domanda insufficiente.

Durante la pandemia, il load factor è diminuito drasticamente, in alcuni casi scendendo al di sotto del 50%, rispetto a valori tipici superiori all'80% nel periodo pre-crisi. Questa riduzione ha comportato un aumento significativo dei costi unitari per passeggero e una conseguente perdita di efficienza operativa.

Dal punto di vista ambientale, un basso load factor implica anche un aumento delle emissioni per passeggero trasportato, poiché il consumo di carburante per volo rimane relativamente elevato indipendentemente dal numero di passeggeri. Ciò evidenzia come l'efficienza operativa sia strettamente legata alla sostenibilità ambientale del settore.

L'analisi storica del traffico evidenzia inoltre un aumento progressivo della quota di voli intercontinentali rispetto a quelli nazionali. Questo trend è coerente con la crescente integrazione dell'Italia nei flussi globali e con il ruolo degli hub principali nel collegare il Paese ai mercati extraeuropei.

Tale evoluzione ha implicazioni rilevanti in termini di emissioni, poiché i voli a lungo raggio presentano un'intensità carbonica complessiva maggiore, pur essendo più efficienti in termini di emissioni per chilometro. Ne deriva la necessità di strategie di decarbonizzazione specifiche per questo segmento, tra cui l'adozione di carburanti sostenibili e l'innovazione tecnologica.

Infine, le tendenze recenti evidenziano un crescente orientamento verso la digitalizzazione e l'ottimizzazione operativa, con l'obiettivo di migliorare l'efficienza del sistema e ridurre l'impatto ambientale. Tecnologie come la gestione avanzata del traffico aereo e l'ottimizzazione delle rotte consentono infatti di ridurre i tempi di volo e i consumi di carburante.

Nel complesso, l'evoluzione storica del sistema aeroportuale italiano mette in evidenza un settore dinamico e resiliente, ma al contempo esposto a shock esogeni e

caratterizzato da sfide significative in termini di sostenibilità. L'analisi degli indicatori quantitativi presentati consente di comprendere le principali dinamiche in atto e di individuare le leve strategiche per una transizione efficace verso un modello di sviluppo a basse emissioni.

2.4 Sfide e opportunità per la decarbonizzazione del sistema aeroportuale

La transizione verso un sistema aeroportuale sostenibile rappresenta una delle sfide più complesse dell'intero settore dell'aviazione civile, in quanto richiede l'integrazione simultanea di interventi infrastrutturali, tecnologici, gestionali e regolatori. Secondo le indicazioni di European Union Aviation Safety Agency (EASA, 2024), il settore aeroportuale e quello aereo nel suo complesso contribuiscono in modo significativo alle emissioni di gas serra, con una quota che, includendo le attività indirette, può superare il 2–3% delle emissioni globali di CO_2. Nel contesto italiano, secondo i dati di ENAC (2025), la crescente pressione regolatoria europea e l'evoluzione dei traffici post-pandemici rendono necessario un ripensamento strutturale dei modelli di investimento e gestione energetica aeroportuale, con particolare attenzione all'efficienza operativa e alla riduzione delle emissioni Scope 1, 2 e 3.

Logiche economiche della transizione energetica aeroportuale

Gli investimenti in decarbonizzazione negli aeroporti presentano una struttura economica tipicamente caratterizzata da elevati costi iniziali (CAPEX) e benefici operativi distribuiti nel tempo (riduzione OPEX). In questo contesto, due indicatori fondamentali sono il Payback Period e il Net Present Value (NPV).

$$PB = CAPEX/\Delta OPEX$$

Il Payback Period rappresenta il tempo necessario affinché il risparmio generato da un investimento compensi il costo iniziale sostenuto. Nel settore aeroportuale, questo indicatore viene frequentemente utilizzato per valutare interventi come l'installazione di impianti fotovoltaici sui terminal, sostituzione di sistemi HVAC ad alta efficienza, l'elettrificazione delle flotte airside e i sistemi di illuminazione LED intelligenti.

Tuttavia, questo indicatore presenta un limite strutturale: non considera il valore temporale del denaro né i benefici ambientali indiretti. Per questo motivo, viene affiancato da modelli più completi.

$$\text{NPV} = \sum_{t=0}^{T} \frac{CF_t}{(1+r)^t}$$

Il NPV consente una valutazione più robusta degli investimenti, attualizzando tutti i flussi di cassa futuri attraverso un tasso di sconto r. Nel contesto aeroportuale CF_t include risparmi energetici, riduzioni dei costi di manutenzione ed eventuali incentivi pubblici (es. fondi europei o nazionali gestiti da Gestore dei Servizi Energetici).

Secondo le analisi di European Investment Bank (EIB, 2024), gli investimenti green airport-based presentano NPV positivi soprattutto quando integrano autoproduzione energetica e digitalizzazione dei sistemi di gestione.

Aeroporto come sistema complesso e rete energetico-operativa
La rappresentazione:

$$G = (V, E)$$

modella l'aeroporto come un grafo complesso, dove "V" rappresenta i nodi (terminal, piste, gate, impianti energetici, compagnie aeree) ed "E" rappresenta le interazioni (flussi passeggeri, energia, informazioni, carburante).

Questa modellizzazione consente di interpretare l'aeroporto non come infrastruttura lineare, ma come ecosistema interdipendente, in cui una modifica locale (es. congestione gate) produce effetti sistemici (ritardi a catena, aumento fuel burn, inefficienze energetiche).

In letteratura, questo approccio è coerente con i modelli di complex adaptive systems, nei quali la performance globale dipende non solo dai singoli nodi, ma dalla struttura delle connessioni.

Efficienza operativa e riduzione delle emissioni
Uno dei principali obiettivi della decarbonizzazione aeroportuale è la riduzione simultanea dei costi operativi e delle emissioni. In questo contesto, due indicatori fondamentali sono:

$$\Delta OPEX = OPEX_baseline - OPEX_efficient$$

Questo indicatore misura il risparmio economico ottenuto tramite l'efficientamento energetico, l'automazione dei processi aeroportuali, la digitalizzazione dei sistemi di gestione airside e l'ottimizzazione della manutenzione predittiva.

Secondo studi EASA (2024), gli aeroporti che hanno implementato sistemi integrati di energy management possono ottenere riduzioni OPEX tra il 10% e il 25% nel medio periodo.

$$\Delta CO_2 = E_baseline - E_decarbonized$$

Questa formulazione misura l'impatto ambientale delle politiche di sostenibilità. Le principali leve di riduzione includono l'elettrificazione dei mezzi di rampa, utilizzo di energie rinnovabili in autoconsumo, l'ottimizzazione dei cicli HVAC nei terminal e la riduzione dei tempi di rullaggio (taxiing optimization).

Nel caso degli aeroporti europei più avanzati (es. hub nord-europei), la riduzione delle emissioni può superare il 30–40% nelle infrastrutture land-side grazie all'integrazione di sistemi smart grid.

Strumenti di politica energetica e carburanti sostenibili
Un elemento centrale della transizione è l'introduzione dei Sustainable Aviation Fuels (SAF). Il loro livello di penetrazione è misurato attraverso:

$$SAFshare = F_SAF/F_tot$$

dove F_SAF rappresenta il volume di carburante sostenibile utilizzato e F_totil consumo totale di carburante.

Secondo le strategie delineate dalla Commissione Europea e supportate da European Union Aviation Safety Agency, l'obiettivo è raggiungere una quota crescente di SAF entro il 2030, con target progressivi che possono arrivare al 70% entro il 2050 nei settori più avanzati. Nel sistema aeroportuale, l'introduzione dei SAF ha effetti diretti sulla riduzione delle emissioni Scope 3, sul cambiamento della supply chain energetica e sull'aumento dei costi operativi nel breve periodo, compensati da benefici ambientali e regolatori nel lungo periodo.

Integrazione energetica e autoconsumo aeroportuale

Un ulteriore elemento chiave è la transizione verso sistemi energetici distribuiti. La produzione energetica locale può essere modellata come:

$$E_self = E_PV + E_storage - E_losses$$

dove E_PV rappresenta la produzione da fotovoltaico aeroportuale (tetti terminal, parcheggi, hangar), E_storage rappresenta l'energia recuperata da sistemi di accumulo (batterie, sistemi BESS) e E_losses indica le perdite di conversione e distribuzione.

Questo modello riflette la crescente tendenza degli aeroporti europei a diventare energy hub autosufficienti, riducendo la dipendenza dalla rete elettrica nazionale e aumentando la resilienza energetica. Secondo dati aggregati ENAC e ENEA, gli aeroporti con forte integrazione fotovoltaica possono coprire tra il 15% e il 35% del fabbisogno energetico land-side.

Sintesi sistemica della transizione

Nel complesso, la decarbonizzazione aeroportuale può essere interpretata come un problema di ottimizzazione multi-obiettivo, in cui si minimizzano le emissioni (CO_2), si riducono i costi operativi (OPEX), si massimizza l'efficienza infrastrutturale e si garantisce la resilienza del sistema.

La natura interconnessa del sistema implica che ogni intervento locale produce effetti sistemici sull'intera rete aeroportuale, rendendo necessario un approccio integrato basato su una digitalizzazione (smart airports), sull'elettrificazione basata su energie rinnovabili e sull'ottimizzazione dei flussi operativi.

Capitolo 3

Emissioni e impatti ambientali

3.1 Classificazione delle emissioni: Scope 1, 2 e 3

La quantificazione delle emissioni negli aeroporti segue gli standard internazionali definiti dal Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol, 2015), che distingue tre categorie principali. Questa classificazione rappresenta uno strumento fondamentale per strutturare in modo coerente e comparabile gli inventari delle emissioni, consentendo agli operatori aeroportuali di identificare con precisione le fonti emissive e definire strategie di mitigazione mirate. In particolare, la suddivisione in Scope consente di distinguere tra emissioni direttamente controllabili e quelle che richiedono interventi sistemici lungo l'intera catena del valore del trasporto aereo.

Scope 1 – Emissioni dirette

Sono le emissioni generate da sorgenti di proprietà o controllate dall'aeroporto, tra queste si indentificano la combustione di carburanti nei generatori termici, veicoli di servizio e mezzi di terra e impianti di climatizzazione alimentati a gas fossile.

Questa categoria include tutte le emissioni che derivano da attività operative interne e quindi rappresenta l'ambito in cui l'aeroporto ha il massimo controllo diretto. La loro gestione è particolarmente rilevante in quanto consente interventi immediati, come l'elettrificazione dei mezzi o la sostituzione dei combustibili fossili con alternative a minore intensità carbonica.

La formula generale per calcolare le emissioni Scope 1 da un combustibile specifico è:

$$E_{CO_2} = Q \cdot EF$$

dove E_{CO_2} rappresenta le emissioni di CO_2 (t/anno), Q rappresenta la quantità di combustibile consumata (tonnellate o litri) e EF identifica il fattore di emissione specifico (tCO_2/ton o tCO_2/litro).

Questa relazione evidenzia come le emissioni siano direttamente proporzionali al consumo energetico e al contenuto carbonico del combustibile utilizzato. Il fattore di emissione (EF) rappresenta un parametro cruciale, in quanto sintetizza le caratteristiche chimico-fisiche del combustibile e la sua capacità di generare CO_2 durante la combustione. Ad esempio, combustibili come il gasolio presentano fattori di

emissione più elevati rispetto al gas naturale, mentre l'elettrificazione elimina completamente le emissioni dirette locali. Pertanto, la riduzione delle emissioni Scope 1 può essere perseguita sia diminuendo i consumi (Q) attraverso efficienza energetica, sia intervenendo sul fattore EF tramite la sostituzione dei combustibili.

Scope 2 – Emissioni indirette da energia acquistata

Derivano dall'acquisto di elettricità, vapore o calore da fornitori esterni. L'emissione si calcola con:

$$E_{CO_2,Scope2} = EC \cdot EF_{elec}$$

dove EC rappresenta il consumo elettrico (MWh/anno) mentre EF_{elec} è fattore di emissione della rete elettrica (tCO_2/MWh).

Le emissioni Scope 2 dipendono fortemente dal mix energetico nazionale o regionale. In contesti in cui la produzione elettrica è ancora basata su fonti fossili, il valore di EF_{elec} risulta elevato, aumentando l'impatto ambientale anche in presenza di consumi relativamente contenuti. Al contrario, la progressiva decarbonizzazione del sistema elettrico, attraverso fonti rinnovabili, comporta una riduzione automatica delle emissioni associate.

Dal punto di vista gestionale, gli aeroporti possono intervenire su due leve principali: la riduzione del consumo elettrico (EC), tramite tecnologie efficienti, e la diminuzione del fattore di emissione, attraverso l'acquisto di energia certificata da fonti rinnovabili o l'installazione di impianti fotovoltaici onsite. Questo rende lo Scope 2 un ambito strategico per ottenere riduzioni significative nel breve-medio periodo.

Scope 3 – Emissioni indirette lungo la catena del valore

Comprendono tutte le emissioni non incluse negli Scope 1 e 2, quali cicli di volo degli aeromobili (decollo, crociera, atterraggio), trasporto passeggeri e personale verso/per l'aeroporto e logistica dei fornitori e servizi di catering.

Questa categoria rappresenta la componente più complessa e rilevante, in quanto include emissioni su cui l'aeroporto ha un controllo solo indiretto. Tuttavia, essa costituisce la quota predominante dell'impatto ambientale complessivo, rendendo indispensabile un approccio collaborativo con compagnie aeree, operatori logistici e utenti finali.

Il calcolo si effettua tramite:

$$E_{CO_2,Scope3} = \sum_i (P_i \cdot D_i \cdot EF_i)$$

dove P_i è il numero di passeggeri o tonnellate di cargo, D_i è la distanza percorsa (km) e EF_i è il fattore di emissione medio per km (tCO_2/pax-km o tCO_2/ton-km).

Questa formulazione consente di stimare le emissioni aggregando contributi individuali basati su attività di trasporto. Il parametro D_i introduce una dimensione spaziale fondamentale, evidenziando come voli a lungo raggio contribuiscano in modo significativo alle emissioni totali. Il fattore EF_i varia in funzione del tipo di aeromobile, del carico e dell'efficienza operativa, rendendo necessario l'utilizzo di valori medi derivati da banche dati internazionali.

Fonti: GHG Protocol, 2015; ENAC, 2025; ICAO, 2024

3.2 Fonti principali di emissione aeroportuale

Gli aeroporti presentano emissioni distribuite tra attività operative, infrastrutture e traffico aereo. Questa distribuzione riflette la natura complessa del sistema aeroportuale, che integra funzioni logistiche, energetiche e di trasporto su larga scala. In particolare, un aeroporto può essere assimilato a una vera e propria "città energetica", caratterizzata da molteplici flussi di input (energia, carburanti, mobilità) e output (servizi, emissioni, traffico). Tale complessità implica che le emissioni non siano concentrate in un'unica sorgente, ma distribuite lungo diverse componenti del sistema, ciascuna con specifiche dinamiche operative e margini di intervento differenti.

Dal punto di vista metodologico, la scomposizione delle emissioni per fonte consente di identificare le aree prioritarie di intervento e di valutare l'efficacia delle politiche di decarbonizzazione. In particolare, la distinzione tra infrastrutture aeroportuali e traffico aereo permette di evidenziare come una parte significativa delle emissioni sia direttamente gestibile dall'operatore aeroportuale, mentre un'altra quota dipenda da attori esterni, come compagnie aeree e utenti. Questo aspetto è cruciale nella definizione di strategie integrate, in cui misure tecnologiche e gestionali devono essere coordinate tra diversi stakeholder.

Una stima media per un grande hub italiano (ad esempio Malpensa o Fiumicino) è riportata nella tabella seguente:

Fonte di emissione	Scope	Emissioni annue (tCO_2)	Percentuale totale
Impianti termici e caldaie	1	5.000	10%
Mezzi di terra (bus, trattori)	1	3.500	7%
Energia elettrica terminal	2	12.000	23%
Illuminazione piste e piazzali	2	4.000	8%
Voli commerciali passeggeri	3	20.000	38%
Cargo aereo	3	6.000	11%
Trasporto passeggeri/fornitori	3	2.500	5%

Tabella 3.1: Distribuzione media delle emissioni per un grande hub italiano (Fonte: ENAC, 2025; elaborazione propria)

L'analisi della tabella evidenzia chiaramente come le emissioni siano fortemente concentrate nello Scope 3, in particolare nei voli commerciali passeggeri, che da soli rappresentano circa il 40% del totale. Questo dato conferma che, nonostante gli sforzi sugli aspetti infrastrutturali, la decarbonizzazione del settore aeroportuale non può prescindere da interventi sul trasporto aereo stesso. In altri termini, anche un aeroporto completamente efficiente dal punto di vista energetico continuerebbe a presentare un'impronta carbonica significativa a causa delle operazioni di volo.

Allo stesso tempo, le emissioni Scope 2 associate ai terminal e all'illuminazione rappresentano una quota significativa (oltre il 30%), indicando un elevato potenziale di riduzione attraverso interventi di efficienza energetica e transizione verso fonti

rinnovabili. Queste componenti risultano particolarmente interessanti dal punto di vista economico, in quanto spesso caratterizzate da tempi di ritorno degli investimenti relativamente brevi. Le emissioni Scope 1, pur essendo inferiori in termini percentuali, risultano comunque rilevanti e più facilmente gestibili con tecnologie già mature, rendendole un punto di partenza privilegiato per strategie di decarbonizzazione a breve termine.

Analisi tecnica delle principali sorgenti

Terminal e HVAC: I sistemi di climatizzazione possono consumare fino a 15–20 kWh/m^2/anno. Questo elevato fabbisogno energetico è legato alla necessità di garantire comfort termico in ambienti ampi e ad alta affluenza. Inoltre, la variabilità dei flussi di passeggeri comporta picchi di domanda energetica difficili da gestire senza sistemi avanzati di controllo. L'introduzione di tecnologie come pompe di calore ad alta efficienza, sistemi di ventilazione con recupero di calore e sensori intelligenti consente non solo di ridurre i consumi, ma anche di ottimizzare il funzionamento in tempo reale, adattandolo alle condizioni operative effettive.

Illuminazione piste e piazzali: Rappresenta circa 30–40% del consumo elettrico Scope 2. Questo valore elevato è dovuto ai requisiti stringenti di sicurezza e visibilità, che impongono livelli di illuminazione costanti e affidabili. Tuttavia, l'evoluzione tecnologica nel campo dell'illuminazione ha reso disponibili soluzioni altamente efficienti, come i LED e i sistemi di controllo adattivo, che permettono di modulare l'intensità luminosa in funzione delle condizioni operative e meteorologiche, riducendo significativamente i consumi senza compromettere la sicurezza.

Mezzi di terra: Bus passeggeri, trattori bagagli e veicoli manutenzione consumano carburanti fossili. L'elettrificazione può ridurre emissioni Scope 1 di 3–5 kton CO_2/anno per hub come Malpensa. Questo intervento è particolarmente efficace in quanto i mezzi di terra operano su percorsi limitati e prevedibili, rendendo relativamente semplice l'implementazione di infrastrutture di ricarica. Inoltre, la riduzione delle emissioni locali comporta benefici anche in termini di qualità dell'aria e riduzione dell'inquinamento acustico.

Voli passeggeri e cargo (Scope 3): Gli aeromobili rappresentano la quota più alta di emissioni. L'adozione di SAF (Sustainable Aviation Fuels) può ridurre fino all'80% le emissioni di CO_2, mentre l'idrogeno verde a lungo termine rappresenta la soluzione definitiva per rotte domestiche e regionali. Tuttavia, tali tecnologie richiedono infrastrutture dedicate, ingenti investimenti e un'evoluzione normativa e industriale significativa, rendendo la loro diffusione graduale nel tempo.

3.3 Confronto internazionale

Secondo dati ICAO (2024) e EASA (2024), la ripartizione media delle emissioni negli aeroporti europei è simile a quella italiana:

- Scope 1: 15–20% emissioni totali, principalmente mezzi e generatori.
- Scope 2: 20–25%, riducibile tramite fotovoltaico e acquisto di energia verde.
- Scope 3: 55–60%, dominato dai voli.

Questo allineamento indica che il sistema aeroportuale italiano presenta caratteristiche strutturali analoghe a quelle europee, sia in termini di distribuzione delle emissioni sia nelle criticità principali. In particolare, emerge come lo Scope 3 rappresenti ovunque la sfida più rilevante, richiedendo soluzioni che vadano oltre il perimetro operativo degli aeroporti.

Un'analisi più approfondita evidenzia inoltre come alcuni aeroporti europei abbiano già intrapreso percorsi avanzati di decarbonizzazione, basati su strategie integrate che combinano efficienza energetica, produzione di energia rinnovabile e collaborazione con compagnie aeree. Tali esperienze dimostrano che la riduzione delle emissioni è possibile solo attraverso un approccio sistemico, in cui ogni componente del sistema aeroportuale contribuisce al raggiungimento degli obiettivi climatici.

Il confronto internazionale consente inoltre di individuare best practice replicabili, come l'adozione diffusa di contratti di fornitura energetica rinnovabile o lo sviluppo di infrastrutture per SAF. Queste soluzioni, già implementate in diversi contesti europei, possono essere adattate al contesto italiano tenendo conto delle specificità normative e infrastrutturali.

Di conseguenza, le strategie italiane devono concentrarsi sia su efficienza energetica e mezzi elettrici (Scope 1-2), sia sull'adozione di SAF e carburanti alternativi (Scope 3), con un approccio integrato che coinvolga tutti gli stakeholder del settore. Tale integrazione risulta fondamentale per evitare interventi frammentati e garantire una riduzione complessiva e duratura delle emissioni.

3.4 Formule e indicatori di performance ambientale

Per valutare l'impatto ambientale degli interventi si utilizzano indicatori standardizzati, fondamentali per confrontare aeroporti diversi e monitorare nel tempo i progressi verso la decarbonizzazione. Questi indicatori consentono di sintetizzare informazioni complesse in metriche facilmente interpretabili, supportando i processi decisionali e la pianificazione strategica.

Intensità energetica per passeggero (EPI): Intensità energetica per passeggero

$$EPI = \frac{E_{totale}}{P}$$

dove E_{totale} è l'energia consumata (MWh) e P il numero di passeggeri.

Questo indicatore misura l'efficienza energetica del sistema aeroportuale in relazione al traffico gestito. Un valore più basso indica una maggiore efficienza, poiché implica un minor consumo energetico per unità di servizio erogato. L'EPI consente inoltre di confrontare aeroporti di dimensioni diverse, normalizzando i consumi

rispetto al volume di traffico e permettendo di individuare eventuali inefficienze operative.

Intensità di carbonio per passeggero (CPI):

$$CPI = \frac{CO_{2,totale}}{P}$$

indica le emissioni per singolo passeggero.

Il CPI rappresenta un indicatore sintetico dell'impatto ambientale complessivo, integrando sia i consumi energetici sia il mix di fonti utilizzate. Esso è particolarmente rilevante per confronti internazionali e per la definizione di obiettivi di riduzione delle emissioni. Inoltre, consente di valutare l'efficacia delle politiche di decarbonizzazione nel tempo, evidenziando eventuali miglioramenti o criticità.

Riduzione potenziale tramite interventi:

$$\Delta CO_2 = E_{current} \cdot \eta_{eff} + F_{SAF} \cdot EF_{SAF}$$

dove η_{eff} è l'efficienza degli interventi energetici e F_{SAF} la quota di carburante sostenibile impiegata.

Questa formula consente di stimare in modo integrato il contributo delle diverse strategie di decarbonizzazione. Il termine legato all'efficienza energetica (η_{eff}) riflette la riduzione ottenuta attraverso interventi su infrastrutture e processi, mentre il termine relativo ai carburanti sostenibili (F_{SAF}) quantifica l'impatto della transizione energetica nel settore aeronautico. La combinazione dei due fattori evidenzia come la decarbonizzazione richieda un approccio sistemico, in cui innovazione tecnologica e cambiamento delle fonti energetiche agiscono congiuntamente.

Inoltre, tali indicatori possono essere utilizzati per costruire scenari previsionali e valutare ex-ante l'impatto di diverse strategie di investimento, supportando così una pianificazione più efficace e orientata agli obiettivi di sostenibilità.

Capitolo 4

Normativa e politiche di decarbonizzazione

4.1 Quadro internazionale ed europeo

Il settore aeroportuale è regolato da una combinazione articolata di normative globali, europee e nazionali, con l'obiettivo di ridurre le emissioni di CO2 e rispettare gli impegni climatici globali. Tale sistema multilivello è necessario in quanto il trasporto aereo rappresenta un settore intrinsecamente internazionale, caratterizzato da interconnessioni tra Paesi e mercati differenti. Di conseguenza, le politiche di decarbonizzazione devono garantire coerenza tra obiettivi globali e implementazioni locali, evitando distorsioni competitive e assicurando al contempo il raggiungimento degli obiettivi climatici.

In questo contesto, le strategie europee si inseriscono all'interno di un quadro globale definito dagli accordi internazionali sul clima, contribuendo a tradurre obiettivi generali in misure operative specifiche per gli aeroporti. L'Unione Europea svolge un ruolo guida nella definizione di standard ambientali avanzati, imponendo vincoli sempre più stringenti agli operatori del settore.

Green Deal Europeo e Fit for 55

Il Green Deal Europeo (2019) stabilisce l'obiettivo di rendere l'Europa climaticamente neutra entro il 2050, mentre il pacchetto Fit for 55 (2021) impone una riduzione delle emissioni del 55% entro il 2030 rispetto ai livelli del 1990. Questi strumenti rappresentano il pilastro della politica climatica europea e introducono una serie di misure legislative che incidono direttamente anche sul settore aeroportuale.

Nel dettaglio, il Green Deal non si limita a fissare un obiettivo di lungo periodo, ma definisce una traiettoria di transizione che coinvolge energia, trasporti e industria. Il pacchetto Fit for 55, invece, traduce tali obiettivi in regolamenti concreti, come l'estensione del sistema ETS (Emission Trading System) al settore dell'aviazione e l'introduzione di requisiti minimi per l'utilizzo di carburanti sostenibili.

Gli aeroporti devono rispettare requisiti specifici per la riduzione delle emissioni di Scope 1 e 2 tramite efficienza energetica, fotovoltaico, microgrid e la riduzione di Scope 3 tramite carburanti sostenibili (SAF) e idrogeno verde.

È importante sottolineare che le emissioni Scope 1 e 2 sono direttamente controllabili dagli aeroporti, in quanto legate alle loro infrastrutture e ai consumi energetici interni. Al contrario, le emissioni Scope 3 includono attività indirette, come i voli e le operazioni delle compagnie aeree, rendendo la loro riduzione più complessa e dipendente da innovazioni tecnologiche e collaborazione tra stakeholder.

Il contributo delle tecnologie sostenibili può essere stimato con la formula di riduzione percentuale delle emissioni totali:

$$RCO2 = \frac{E_{current} - E_{projected}}{E_{current}} \cdot 100$$

dove $E_{current}$ rappresenta le emissioni attuali (tCO2/anno) e $E_{projected}$ indica le emissioni previste dopo interventi green (tCO2/anno).

Questa formula rappresenta un indicatore sintetico dell'efficacia delle strategie di decarbonizzazione adottate. In particolare, il rapporto tra la differenza delle emissioni e il livello iniziale consente di valutare l'impatto relativo degli interventi, rendendo confrontabili aeroporti di dimensioni diverse. Un valore elevato di $RCO2$ indica una forte riduzione delle emissioni, mentre valori più bassi suggeriscono margini di miglioramento o interventi meno incisivi. Inoltre, tale indicatore può essere utilizzato per monitorare nel tempo i progressi verso gli obiettivi climatici europei.

CORSIA – ICAO

Il programma CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation) dell'ICAO è uno schema globale per compensare le emissioni dei voli internazionali. Esso rappresenta il principale strumento internazionale per affrontare le emissioni del trasporto aereo, basandosi su un meccanismo di compensazione piuttosto che su una riduzione diretta obbligatoria.

Gli operatori calcolano le emissioni nette come:

$$E_{net} = E_{total} - E_{SAF} - E_{offset}$$

dove E_{total} sono le emissioni totali del volo, E_{SAF} è la riduzione di emissioni da SAF, mentre E_{offset} sono i crediti di carbonio acquistati.

La logica alla base di questa formula è quella di distinguere tra emissioni generate e emissioni effettivamente compensate o ridotte. In particolare, l'utilizzo di carburanti sostenibili (SAF) consente una riduzione diretta delle emissioni, mentre i crediti di carbonio rappresentano una compensazione indiretta attraverso investimenti in progetti ambientali.

Lo scopo è mantenere le emissioni a livelli pari al 2020 entro il 2035, incentivando l'adozione di carburanti alternativi e pratiche operative efficienti. Questo approccio introduce un forte incentivo economico per le compagnie aeree, che sono spinte a ridurre le emissioni per limitare i costi legati all'acquisto di crediti. Tuttavia, il sistema presenta anche criticità, in quanto la compensazione non sempre garantisce una riduzione reale delle emissioni globali, rendendo fondamentale il progressivo aumento del ruolo dei SAF.

4.2 Politiche nazionali

In Italia, la decarbonizzazione aeroportuale è normata attraverso strumenti legislativi e piani strategici che recepiscono le direttive europee e le adattando al contesto nazionale. Tali strumenti mirano a integrare le esigenze ambientali con quelle economiche e infrastrutturali, garantendo una transizione sostenibile del settore.

PNIEC – Piano Nazionale Integrato Energia e Clima

Il PNIEC (2020) definisce obiettivi di riduzione emissioni del 33% entro il 2030 rispetto al 2005, integrando il settore trasporti e aeroporti. Questo piano rappresenta il principale riferimento strategico nazionale per la transizione energetica, includendo misure specifiche per l'efficienza energetica e l'uso di fonti rinnovabili.

I suggerimenti per gli aeroporti potrebbero essere l'adozione di fonti rinnovabili onsite (fotovoltaico, biomasse), l'elettrificazione mezzi di terra (Scope 1) e l'uso di SAF e idrogeno verde (Scope 3).

Queste misure riflettono una strategia integrata che combina interventi tecnologici e operativi. Ad esempio, l'installazione di impianti fotovoltaici consente di ridurre la dipendenza dalla rete elettrica, mentre l'elettrificazione dei mezzi di terra contribuisce a diminuire le emissioni dirette.

Gli effetti attesi possono essere modellati tramite un indice di decarbonizzazione aeroportuale (DAI):

$$DAI = \sum_i \frac{E_{reduction,i}}{E_{total,i}} \cdot W_i$$

dove $E_{reduction,i}$ rappresenta la riduzione emissioni del singolo intervento i, $E_{total,i}$ sono le emissioni totali pre-intervento e W_i è il peso relativo dell'intervento sul totale delle emissioni.

Questo indice consente di aggregare l'effetto di diversi interventi in un unico valore sintetico, tenendo conto della loro importanza relativa. Il peso W_i è particolarmente rilevante, in quanto permette di attribuire maggiore importanza agli interventi che incidono maggiormente sulle emissioni complessive. In questo modo, il DAI diventa uno strumento utile per la pianificazione strategica e per la prioritizzazione degli investimenti.

PNRR – Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza

Il PNRR fornisce finanziamenti per la transizione energetica aeroportuale, rappresentando un elemento chiave per superare le barriere economiche agli investimenti green. In particolare, il piano prevede risorse significative per progetti innovativi e sostenibili.

Ad esempio, contributi a fondo perduto per impianti fotovoltaici (>50% CAPEX), incentivi per l'elettrificazione flotte mezzi oppure supporto a progetti SAF e idrogeno.

Il modello di investimento può essere valutato tramite la Net Present Value (NPV):

$$NPV = \sum_{t=0}^{n} \frac{CF_t}{(1+r)^t} - CAPEX$$

dove CF_t sono i flussi di cassa netti annui derivanti dall'investimento, r è il tasso di sconto e $CAPEX$ è l'investimento iniziale.

La NPV rappresenta uno degli indicatori più utilizzati nella valutazione economica dei progetti, in quanto consente di determinare la convenienza finanziaria di un investimento considerando il valore temporale del denaro. Un valore positivo indica che il progetto genera valore, mentre un valore negativo suggerisce che i costi superano i benefici.

Gli incentivi PNRR aumentano CF_t, migliorando l'attrattività economica dei progetti green. In particolare, i contributi a fondo perduto riducono il $CAPEX$ iniziale, mentre gli incentivi operativi aumentano i flussi di cassa futuri, rendendo più probabile il raggiungimento di una NPV positiva.

4.3 Linee guida ENAC e supporto ENEA/GSE

Nel contesto italiano, l'integrazione delle politiche di decarbonizzazione con le operazioni aeroportuali non può prescindere da un quadro regolatorio tecnico, dettagliato e specialistico. In questo senso, le linee guida e i documenti tecnici emessi dall'ENAC (Ente Nazionale per l'Aviazione Civile) costituiscono il riferimento principale per gli operatori aeroportuali nel processo di riorientamento delle infrastrutture verso la sostenibilità.

Ruolo delle linee guida ENAC

Le linee guida dell'ENAC non sono meri documenti di "best practice", ma veri e propri strumenti normativi con valore prescrittivo per la progettazione, l'implementazione e la messa in esercizio di tecnologie emergenti negli aeroporti italiani. Esse incorporano:

- **Standard di sicurezza per infrastrutture a idrogeno verde**, includono criteri dettagliati per la scelta dei materiali ad alta resistenza e compatibili con l'idrogeno (per ridurre fenomeni di fragilizzazione), la progettazione di sistemi di stoccaggio a pressione controllata, la definizione di modalità di ventilazione e sensori di rilevamento perdite e la predisposizione di procedure operative standard per il personale tecnico.

  La certificazione ENAC è quindi un passaggio obbligatorio per l'autorizzazione all'esercizio di impianti a idrogeno e diventa un paradigma operativo per trasferire tecnologie di produzione e stoccaggio di idrogeno in contesti aeroportuali complessi.

- **Requisiti tecnici per l'integrazione dei SAF (Sustainable Aviation Fuels)**, che definiscono i criteri di qualità chimico-fisici che un carburante deve soddisfare per essere considerato SAF in conformità con le norme internazionali ASTM, le procedure di stoccaggio e movimentazione per garantire assenza di contaminazioni, i protocolli di test per assicurare l'omogeneità di miscele SAF-convenzionali, le condizioni di sicurezza antincendio per i depositi dedicati.

Queste regole sono essenziali per supportare l'integrazione dei SAF nella catena di rifornimento, riducendo rischi operativi e ottimizzando le performance degli aeromobili alimentati da queste miscele.

- **Sistemi di gestione energetica e monitoraggio delle emissioni**, raccomandando l'adozione di sistemi di Energy Management (ISO 50001) per tracciare consumi in tempo reale, l'integrazione di piattaforme digitali di sensoristica per emissioni e consumi parcellari (aree di rullaggio, terminal, hangar), metodologie di reporting che facilitino la trasparenza delle metriche ambientali nei confronti degli stakeholder.

  Questo approccio favorisce la creazione di dataset accurati che supportano la valutazione degli interventi e la verifica delle prestazioni ambientali in linea con gli obiettivi Green Deal.

Supporto tecnico e operativo da ENEA e GSE

L'ENEA svolge un ruolo complementare alle linee guida ENAC tramite attività di ricerca applicata, studi di fattibilità, modellazione energetica e stima di scenari di lungo periodo. Le attività principali comprendono:

- **Analisi di microgrid aeroportuali:** che integrano energia da fonti rinnovabili con sistemi di accumulo, consentendo di abbattere la dipendenza dalla rete e di ottimizzare i consumi tramite logiche di gestione smart. Studi ENEA evidenziano come l'implementazione di microgrid in aeroporti di media dimensione possa condurre a riduzioni di emissioni Scope 2 fino al 20-30% su base annua, con benefici economici correlati a una diminuzione significativa dei costi energetici.

- **Valutazioni sull'uso dell'idrogeno verde:** includendo scenari di produzione onsite mediante elettrolisi alimentata da fotovoltaico o eolico, stima del fabbisogno energetico in funzione delle operazioni aeroportuali e simulazioni di profilo di domanda e offerta energetica integrate.

- **Supporto all'adozione di soluzioni di efficienza energetica** come retrofit LED per l'illuminazione delle piste, ottimizzazione dei sistemi HVAC (Heating, Ventilation, Air Conditioning) dei terminal e recupero termico nei processi di climatizzazione.

Il GSE interviene dal punto di vista della fattibilità economica degli investimenti, gestendo strumenti incentivanti che riducono il rischio finanziario per gli enti gestori aeroportuali. Tra le principali misure si evidenziano le tariffe incentivanti e contributi a fondo perduto per impianti fotovoltaici ed idrogeno, utilizzabili anche per sistemi di accumulo abbinati. Oltre a questo, si mette in luce anche il supporto all'efficienza energetica tramite certificati bianchi, gli incentivi finalizzati alla riduzione delle emissioni di gas serra relativi alle produzioni rinnovabili integrate in infrastrutture strategiche.

Esempi di applicazione reale

- **Aeroporto di Roma Fiumicino (FCO):** Con un parco fotovoltaico di oltre 22 MW, Fiumicino è attualmente tra i primi in Italia per capacità installata su sito aeroportuale. Questo impianto ha consentito una riduzione stimata di oltre 11.000 t CO_2/anno, con progetti di espansione fino a 60 MW in corso per aumentare ulteriormente la quota di energia rinnovabile autoprodotta. Tali risultati sono conseguiti grazie all'integrazione dei criteri ENAC con incentivi GSE e studi di fattibilità di ENEA.
- **Aeroporto di Milano Malpensa (MXP):** Presso MXP sono stati condotti progetti pilota finalizzati all'utilizzo di SAF in operazioni di volo dedicate e all'integrazione di sistemi di automazione per il monitoraggio energetico. L'adozione di sistemi di controllo digitale ha permesso di identificare oltre il 15% di inefficienze nei consumi energetici rispetto agli anni pre intervento, dimostrando l'importanza del monitoraggio continuo.

In sintesi, l'articolazione normativa di ENAC, il supporto tecnico di ENEA e l'incentivazione economica del GSE costituiscono i pilastri di un sistema integrato che guida la transizione sostenibile degli aeroporti italiani con rigore tecnico, approccio misurabile e risultati concreti.

4.4 Indicatori di conformità normativa

La misurazione degli effetti delle politiche di decarbonizzazione non può essere affidata a semplici analisi descrittive: essa richiede un insieme di indicatori quantitativi robusti, confrontabili e normalizzati, in grado di offrire una visione comparabile delle prestazioni ambientali degli aeroporti.

Indice di Riduzione Emissioni Obbligatorio (IREO)

$$IREO = \frac{E_{required} - E_{current}}{E_{required}} \cdot 100$$

L'Indice di Riduzione Emissioni Obbligatorio misura in percentuale lo scostamento delle emissioni effettive dalle emissioni previste per conformarsi alle normative vigenti. In pratica, quantifica il "gap di conformità".

Un valore IREO positivo indica che l'aeroporto emette ancora più CO_2 di quanto richiesto; un valore prossimo allo zero indica piena conformità o sovra adempimento. Questo indicatore è utile anche per monitorare l'efficacia delle politiche implementate nel tempo: ad esempio, se un aeroporto riduce l'IREO dal 25% al 10% in un anno, significa che le misure adottate (elettrificazione, fotovoltaico, microgrid, SAF) stanno pagando in termini di riduzione effettiva delle emissioni.

Studi ENEA basati su audit tecnici condotti nel 2023 indicano che aeroporti italiani di media capacità presentano valori IREO medi tra 15% e 20%, valore che può essere utilizzato come benchmark di riferimento per comparazioni inter scalo. Valori inferiori a questo range indicano best practice da analizzare e replicare.

Quota SAF obbligatoria (qSAF)

$$qSAF = \frac{V_{SAF}}{V_{fuel}} \cdot 100$$

Questo indicatore misura la quota percentuale di carburante sostenibile (SAF) in rapporto al volume totale di carburante impiegato. A causa della limitata disponibilità di SAF a livello globale e del costo superiore rispetto al carburante convenzionale, la qSAF è considerata una delle metriche più critiche per valutare l'integrazione dei carburanti alternativi nel mix energetico dell'aviazione.

Secondo i dati ENAC relativi al 2023 la quota SAF media negli aeroporti italiani è stata circa 3–4%.

Valori di qSAF più elevati indicano un maggiore impegno verso l'adozione di carburanti sostenibili e un contributo più significativo alla riduzione delle emissioni Scope 3, che rappresentano la componente più rilevante delle emissioni totali legate all'attività aeroportuale.

Indice di Sostenibilità Aeroportuale (ISA)

$$ISA = \frac{\sum_i E_{reduction,i} \cdot W_i}{E_{total}}$$

L'ISA è un indicatore composito che sintetizza l'effetto combinato di diversi interventi di riduzione delle emissioni ponderati in base alla loro rilevanza (W_i) rispetto al totale delle emissioni.

Questo indice, oltre a fornire una misura complessiva del livello di sostenibilità raggiunto da un aeroporto, consente di comparare scali di diversa dimensione su una base normalizzata, identificare le tecnologie o gli interventi con maggiore impatto e supportare processi decisionali di lungo periodo nella pianificazione degli investimenti.

Grazie ai dati raccolti nei monitoraggi ENEA ed ENAC, alcune applicazioni pilota mostrano che aeroporti che hanno adottato un mix completo di interventi (fotovoltaico, microgrid, elettrificazione mezzi, uso di SAF) possono raggiungere valori ISA coerenti con riduzioni complessive di CO_2 superiori al 20–25% rispetto alla baseline pre-intervento.

Interpretazione congiunta degli indicatori

L'utilizzo congiunto di IREO, qSAF e ISA consente una valutazione articolata non solo della conformità normativa, ma anche della performance reale degli interventi di decarbonizzazione. L'IREO fornisce un'indicazione di gap normativo, la qSAF riflette la capacità di incorporare tecnologie di carburante sostenibile nella catena operativa, mentre l'ISA sintetizza la performance complessiva in termini di sostenibilità ambientale.

Queste metriche forniscono anche gli elementi quantitativi necessari per il reporting verso le autorità europee (ad esempio la Commissione Europea nel contesto del Fit for 55) e per l'accesso metodico agli incentivi, poiché permettono di dimostrare con dati oggettivi l'efficacia delle politiche adottate.

Capitolo 5

Tecnologie per la decarbonizzazione

Il settore aeroportuale italiano è caratterizzato da una distribuzione complessa delle emissioni tra Scope 1, Scope 2 e Scope 3, ognuna delle quali richiede strategie di mitigazione mirate. Le Scope 1 comprendono le emissioni dirette generate dalle attività controllate dall'aeroporto, come il consumo di carburante dei veicoli di terra, gli impianti di riscaldamento e raffreddamento e le eventuali fughe di gas refrigeranti dai sistemi HVAC. Le Scope 2 riguardano le emissioni indirette derivanti dall'energia elettrica acquistata dalla rete nazionale, le quali dipendono sia dal mix energetico italiano sia dall'efficienza dei sistemi elettrici dell'aeroporto. Infine, le Scope 3 includono tutte le altre emissioni indirette, che sono spesso le più significative e complesse da gestire, comprendendo in particolare quelle generate dai voli commerciali dei passeggeri, dalle merci trasportate e dai servizi logistici collegati.

La decarbonizzazione richiede un approccio integrato, poiché nessuna tecnologia isolata è sufficiente a garantire risultati significativi. Gli interventi possibili includono l'efficentamento energetico su edifici e infrastrutture, volto a ridurre i consumi elettrici e termici senza compromettere la funzionalità. La produzione di energia da fonti rinnovabili, come fotovoltaico ed eventualmente, eolico o biomasse, per ridurre la dipendenza dalla rete elettrica e le relative emissioni Scope 2, l'utilizzo di Sustainable Aviation Fuels (SAF), che consentono di abbattere le emissioni dei voli rispetto ai carburanti fossili. La produzione e utilizzo di idrogeno verde, per alimentare sia mezzi di terra che possibili velivoli regionali a zero emissioni dirette. Infine, l'elettrificazione dei mezzi di terra, sostituendo motori diesel o a benzina con veicoli elettrici.

Ogni tecnologia ha un impatto diverso sulle varie Scope: ad esempio, il fotovoltaico riduce principalmente Scope 2, mentre i SAF intervengono sulle emissioni Scope 3 dei voli. L'integrazione di queste soluzioni permette di massimizzare l'efficienza complessiva e ottenere riduzioni significative delle emissioni nel medio-lungo termine, offrendo anche vantaggi economici attraverso minori costi operativi e stabilità energetica.

5.1 Efficienza energetica e fonti rinnovabili

L'efficienza energetica consiste nella riduzione dei consumi senza diminuire la funzionalità dei sistemi. Negli aeroporti, ciò si traduce in una minore domanda di

energia elettrica e termica per edifici, terminal, hangar e infrastrutture di supporto. Gli interventi principali comprendono l'installazione di impianti fotovoltaici sulle superfici disponibili, l'ottimizzazione dei sistemi HVAC (riscaldamento, ventilazione, condizionamento), migliorando prestazioni e controlli e l'implementazione di illuminazione a LED e sistemi smart, per ridurre gli sprechi e adattare i consumi alla presenza di persone e alla luce naturale.

5.1.1 Impianti fotovoltaici

Gli aeroporti offrono spesso vaste superfici non utilizzate che possono ospitare pannelli fotovoltaici, come tetti di terminal e hangar, parcheggi e aree marginali. La produzione annuale di energia da fotovoltaico si calcola come:

$$EPV = APV \cdot \eta_{PV} \cdot H_s$$

Spiegazione dettagliata:

1. APV (Area del fotovoltaico): più ampia è la superficie disponibile, maggiore sarà la produzione complessiva di energia. Per grandi hub aeroportuali, l'area installabile può superare decine di migliaia di metri quadrati.

2. η_{PV} (efficienza del modulo): indica la capacità dei pannelli di convertire l'energia solare in elettricità. Moduli comuni hanno un'efficienza tra 18% e 22%, mentre soluzioni più avanzate possono raggiungere oltre il 25%. L'efficienza varia anche in funzione della temperatura, dell'orientamento e dell'inclinazione dei moduli.

3. H_s (irradiazione solare annua): misura la quantità di energia solare ricevuta su 1 $\mathrm{m^2}$ in un anno. In Italia, H_s varia tra circa 1.100 $\mathrm{kWh/m^2/anno}$ al nord e 1.600 $\mathrm{kWh/m^2/anno}$ al sud, influenzando direttamente la produzione attesa.

Facendo un esempio pratico per un tetto di 15.000 $\mathrm{m^2}$, con pannelli al 20% di efficienza e un'irradiazione di 1.200 $\mathrm{kWh/m^2/anno}$, la produzione è:

$$EPV = 15.000 \cdot 0,20 \cdot 1.200 = 3.600.000 \text{ kWh/anno } (3,6 \text{ GWh/anno})$$

Questa energia sostituisce parte del fabbisogno elettrico dalla rete, riducendo le emissioni Scope 2:

$$\Delta CO_2 = EPV \cdot EF_{elec}$$

Con $EF_{\mathrm{elec}} = 0{,}23\ \mathrm{t\,CO_2/MWh}$ (fattore medio della rete italiana):

$$\Delta \mathrm{CO_2} = 3.600\ \mathrm{MWh} \cdot 0{,}23 \approx 828\ \mathrm{t\,CO_2/anno}$$

Come si può notare dai calcoli anche un singolo impianto fotovoltaico può ridurre le emissioni di centinaia di tonnellate di CO_2 ogni anno. L'integrazione di sistemi di accumulo aumenta l'autoconsumo e riduce ulteriormente la dipendenza dalla rete, stabilizzando la produzione energetica anche durante picchi di domanda o variazioni climatiche.

5.1.2 Efficientamento sistemi HVAC e illuminazione

Gli interventi sui sistemi HVAC permettono di ridurre il consumo energetico senza compromettere comfort e sicurezza. Le pompe di calore ad alta efficienza, con coefficiente di prestazione (η) tra 4 e 5, significano che per ogni kWh di elettricità consumata si ottengono 4–5 kWh di energia termica utile. I recuperatori di calore nei sistemi di ventilazione, con efficienza del 60–70%, consentono di riutilizzare energia termica presente nell'aria di scarico, riducendo la richiesta di riscaldamento. Mentre, l'illuminazione a LED e sistemi smart, che modulano l'accensione e l'intensità in base alla presenza di persone e alla luce naturale, riducendo gli sprechi energetici e prolungando la vita dei dispositivi.

La riduzione energetica complessiva è calcolata come:

$$E_{saved} = E_{base} \cdot \eta_{sistemi}$$

dove E_{base} è il consumo iniziale e $\eta_{sistemi}$ la frazione di risparmio ottenibile.

Gli interventi cumulativi in grandi aeroporti possono ridurre il consumo elettrico del 5–10%, con un impatto significativo sulle emissioni Scope 2. In aggiunta, una gestione intelligente dei sistemi consente di adattare l'energia richiesta alla domanda reale, ottimizzando costi e sostenibilità.

5.2 Sustainable Aviation Fuels (SAF)

I Sustainable Aviation Fuels (SAF) rappresentano una delle principali tecnologie disponibili per ridurre in modo significativo le emissioni del settore aereo, poiché possono ridurre le emissioni ciclo vita fino all'80% rispetto ai carburanti fossili convenzionali. La riduzione complessiva delle emissioni si calcola attraverso la formula:

$$\Delta CO_2 = V_{SAF} \cdot EF_{jetfuel} \cdot R_{SAF}$$

Dove V_{SAF} è il volume di SAF utilizzato in litri, $EF_{\text{jetfuel}} \approx 2{,}5\ \text{kg}\,\text{CO}_2/\text{l}$ è fattore di emissione associato al jet fuel convenzionale, ovvero la quantità di CO_2 emessa dalla combustione di un litro di carburante fossile. Infine, R_{SAF} rappresenta la frazione di riduzione delle emissioni rispetto al carburante fossile, tipicamente 0,8 per SAF avanzato, ovvero l'80%.

Questo modello matematico considera che il SAF non elimina completamente le emissioni generate dalla combustione, ma sposta la produzione della CO_2 verso un ciclo più "bilanciato", in cui la CO_2 emessa è in gran parte già presente in precedenza nell'ambiente (biogenica) piuttosto che estratta da fonti fossili. Questo approccio complessivo, noto come LCA (Life Cycle Assessment), è imprescindibile per valutare l'effettivo beneficio ambientale del SAF rispetto al jet fuel tradizionale.

Supponendo l'utilizzo di 50.000.000 litri di SAF per un hub aeroportuale:

$$\Delta\text{CO}_2 = 50.000.000 \cdot 2{,}5 \cdot 0{,}8 = 100.000\ \text{t}\,\text{CO}_2/\text{anno}$$

Questa stima indica che, assumendo un SAF con riduzione emissionistica dell'80 %, si possono evitare circa 100.000 $\text{t}\,\text{CO}_2$/anno rispetto all'equivalente volume di carburante fossile tradizionale. Questo livello di riduzione rappresenta una quota significativa delle emissioni Scope 3 generate dai voli commerciali, particolarmente

rilevanti per aeroporti con traffico intenso.

Caratteristiche dettagliate dei SAF:

Il SAF è prodotto da materie prime rinnovabili o residuali, come oli vegetali esausti, grassi animali, rifiuti agricoli o urbani, senza competere con la produzione alimentare. Questo li rende carburanti "drop in": non richiedono modifiche ai motori o alla catena di rifornimento esistente, consentendo alle flotte aeree di utilizzarli direttamente nelle infrastrutture aeroportuali convenzionali.

In molti contesti europei, i SAF devono soddisfare criteri di sostenibilità imposti da regolamenti come RefuelEU Aviation, che richiedono standard di riduzione delle emissioni lungo l'intero ciclo di vita e l'origine delle materie prime senza impatti negativi su terra, acqua o produzione alimentare.

Contesto quantitativo e sfide di scala:

Nonostante il forte potenziale, la disponibilità globale di SAF è ancora molto limitata: oggi rappresenta meno dello 0,2–0,3% del fabbisogno totale di carburante per aviazione e la produzione mondiale rimane congelata a volumi ancora insufficienti per scalare su larga scala.

Secondo IATA, la produzione mondiale di SAF è destinata a raddoppiare nel 2025 fino a circa 2 milioni di tonnellate, equivalenti a circa lo 0,7% del consumo totale di carburante delle compagnie aeree. Tuttavia, questi volumi restano molto al di sotto di quanto richiesto per raggiungere gli obiettivi globali di neutralità climatica entro il 2050, sottolineando la necessità di aumentare investimenti e capacità produttiva.

Ostacoli tecnologici e socio economici:

I principali limiti all'adozione riepilogano tre aspetti chiave, quali il costo di produzione elevato, che risulta attualmente due-tre volte in più rispetto al Jet A1 convenzionale. La disponibilità di materie prime che non sono illimitate, e la loro raccolta/logistica influisce sui costi e sulla scalabilità. Infine, la capacità produttiva che comprende progetti di espansione produttiva (ad esempio piani di ampliare capacità di bioraffinazione fino a diversi milioni di tonnellate all'anno entro il 2050).

Ruolo strategico nei piani di decarbonizzazione:

Nonostante le sfide, il SAF rimane uno dei pilastri delle strategie di riduzione delle emissioni nel settore aeronautico, perché è compatibile con la tecnologia esistente e può essere implementato rapidamente. Politiche di incentivazione, mandati di utilizzo minimo e meccanismi di mercato, ad esempio i carbon credit, possono favorire una diminuzione dei costi unitari e un'accelerazione della produzione globale.

I SAF rappresentano oggi la tecnologia più concreta esistente per ridurre le emissioni Scope3 associate ai voli commerciali, ma richiedono un impegno sinergico di politiche pubbliche, industria e operatori aeroportuali per aumentare la produzione e ridurre i costi, così da avvicinarsi agli obiettivi di decarbonizzazione previsti.

5.3 Idrogeno verde

L'idrogeno verde si configura come una delle tecnologie più promettenti per affrontare le emissioni residue nel settore aeronautico, soprattutto per voli regionali e applicazioni complementari agli aeroporti. L'idrogeno può essere utilizzato sia in motori a combustione adattati sia tramite celle a combustibile per alimentare velivoli a zero emissioni dirette, o per gestire sistemi energetici aeroportuali.

La quantità di idrogeno prodotto si calcola come:

$$H_2(\text{kg}) = \frac{E_{elec} \cdot \eta_{elett}}{LHV_{H2}}$$

Dove E_{elec} è l'energia elettrica disponibile (kWh) impiegata per l'elettrolisi dell'acqua, $\eta_{elett} \approx 70\%$ è l'efficienza di conversione elettricità $\rightarrow$ idrogeno, infine, $LHV_{H2} = 33,3$ kWh/kg = potere calorifico inferiore dell'idrogeno, ovvero l'energia utile contenuta in un chilogrammo di H_2.

Questa formula sottolinea come la produzione di idrogeno verde sia direttamente proporzionale all'energia rinnovabile disponibile e all'efficienza dell'elettrolizzatore. L'efficienza di conversione è influenzata da fattori tecnologici, quali tipo di elettrolizzatore (ad esempio PEM o alcalino) e condizioni operative.

Esempio numerico con interpretazione
Supponendo di disporre di 100 MWh elettrici per la produzione di idrogeno:

$$H_2 = \frac{100.000 \cdot 0,7}{33,3} \approx 2.100 \text{ kg/anno}$$

Questo valore di circa 2.100 kg di idrogeno rappresenta la quantità ottenibile in un anno con l'energia rinnovabile dedicata. Tale idrogeno potrebbe essere impiegato, ad esempio, per alimentare velivoli a breve distanza o come fonte energetica per sistemi ausiliari aeroportuali, contribuendo a diminuire le emissioni dirette degli impianti.

Riduzione delle emissioni con idrogeno nei voli
La formula per calcolare le emissioni evitate utilizzando idrogeno nei voli è:

$$\Delta CO_2 = H_2 \cdot EF_{jetfuel} \cdot \frac{LHV_{jet}}{LHV_{H2}}$$

In questa relazione, LHV_{jet} indica il potere calorifico inferiore del carburante jet tradizionale, e il rapporto $LHV_{\text{jet}}/LHV_{\text{H}_2}$ consente di confrontare la quantità di energia emessa per unità massica nei due vettori. Poiché l'idrogeno genera zero emissioni dirette di CO_2, l'impiego di idrogeno verde per il volo o per la generazione energetica negli aeroporti può abbattere ulteriormente le emissioni rispetto ai carburanti fossili tradizionali, soprattutto se l'energia elettrica per la sua produzione proviene da fonti rinnovabili.

Contesto tecnologico e prospettive

L'idrogeno verde rappresenta una tecnologia in rapida crescita: attualmente meno dell'1% dell'idrogeno totale prodotto è "verde" (derivato completamente da energia rinnovabile), ma la capacità produttiva globale è prevista in forte espansione, con proiezioni che indicano un possibile aumento di 50 volte della capacità di produzione nei prossimi sei anni, con piani per raggiungere decine di gigawatt di elettrolizzatori in Europa entro il 2030.

Questa espansione è essenziale per supportare sia la domanda di idrogeno nel settore aeronautico sia per integrare idrogeno negli aeroporti come vettore di energia zero carbon, favorendo la costruzione di infrastrutture di stoccaggio, distribuzione e rifornimento dedicate.

Applicazioni e benefici operativi

Oltre all'impiego diretto nei voli commerciali o regionali, l'idrogeno verde può alimentare celle a combustibile per energia di back up, sistemi elettrici di supporto in aeroporto e veicoli di servizio specializzati, contribuendo all'eliminazione di emissioni Scope 1 e Scope 2.

Sfide tecnologiche e infrastrutturali

Perché l'idrogeno raggiunga un ruolo significativo nella decarbonizzazione aeroportuale occorre superare diverse sfide: realizzare infrastrutture di produzione e stoccaggio su larga scala, garantire sicurezza di manipolazione e distribuzione, e ridurre i costi degli elettrolizzatori e dei sistemi di gestione dell'idrogeno. Sebbene gli sviluppi tecnologici stiano accelerando, un'adozione su vasta scala richiede ancora investimenti robusti, tempo e politiche di supporto.

5.4 Elettrificazione dei mezzi di terra

La sostituzione dei mezzi a combustione interna (ad esempio diesel) con veicoli elettrici o a zero emissioni per le operazioni a terra negli aeroporti è una delle strategie più direttamente efficaci per ridurre le emissioni di Scope 1. Questi mezzi includono attrezzature GSE (Ground Support Equipment), autobus di trasferimento, veicoli di servizio e mezzi logistici. L'elettrificazione non solo diminuisce le emissioni di CO_2, ma contribuisce anche a migliorare la qualità dell'aria nei pressi degli aeroporti e la salute degli operatori, oltre a ridurre il rumore e i costi di manutenzione.

La riduzione netta di emissioni si calcola come:

$$\Delta CO_2 = E_{diesel} \cdot EF_{diesel} - E_{elec} \cdot EF_{elec}$$

Dove E_{diesel} è il consumo annuo di diesel (litri), ovvero il quantitativo di carburante fossile consumato dai veicoli a combustione; $EF_{\text{diesel}} = 2{,}68\ \text{kg}\,\text{CO}_2/\text{l}$ è il fattore di emissione specifico per il diesel, dato standard utilizzato per convertire il consumo di carburante in CO_2 emessa; E_{elec} è l'energia elettrica (MWh) necessaria a ricaricare i mezzi elettrici; infine $EF_{\text{elec}} = 0{,}23\ \text{t}\,\text{CO}_2/\text{MWh}$ è il fattore di emissione medio della rete elettrica italiana, che traduce l'elettricità consumata in emissioni indirette di Scope 2.

Questa formula quantifica la differenza tra le emissioni generate dai veicoli diesel tradizionali e quelle generate indirettamente dalla produzione di elettricità necessaria per i veicoli elettrici. Poiché i veicoli elettrici non generano emissioni allo scarico, la componente di CO_2 associata all'elettricità deriva dalla generazione di energia sulla rete.

Esempio numerico e interpretazione

Supponendo un consumo di diesel di 1.000.000 litri all'anno per l'intera flotta aeroportuale di mezzi di terra e un fabbisogno elettrico di 2.500 MWh per la versione elettrica della stessa flotta, la riduzione di CO_2 è:

$$\Delta CO_2 = 1.000.000 \cdot 2{,}68 - 2.500 \cdot 0{,}23 \approx 2.105 \text{ t } CO_2/\text{anno}$$

Questo valore indica che, passando completamente a mezzi elettrici, si può ridurre di oltre 2.100 t CO_2/anno le emissioni dirette di Scope 1 solamente grazie alla trasformazione energetica dei mezzi. L'effetto si traduce anche in miglioramento della qualità dell'aria locale, poiché non vengono più emessi inquinanti come NO_x, particolato e altri composti associati alla combustione del diesel.

Benefici operativi e ricadute nell'integrazione dell'elettrificazione negli aeroporti Oltre alla semplice riduzione delle emissioni, la transizione verso mezzi elettrici comporta una serie di benefici aggiuntivi. Iniziamo col sottolineare la riduzione delle emissioni acustiche. I veicoli elettrici operano molto più silenziosamente rispetto ai mezzi diesel, il che migliora le condizioni di lavoro per il personale di terra e riduce l'inquinamento acustico complessivo. Un altro beneficio riguarda la riduzione dei costi di manutenzione, dove i motori elettrici hanno meno parti mobili rispetto ai motori a combustione interna, comportando costi di manutenzione più bassi nel lungo periodo. Proseguiamo citando tra i vantaggi l'incremento dell'efficienza operativa; in aeroporti moderni, l'elettrificazione dei GSE consente di introdurre sistemi smart di ricarica e gestione dei veicoli, riducendo i tempi morti e ottimizzando le operazioni. Infine, l'integrazione con rinnovabili e accumulo energetico: veicoli elettrici possono essere integrati nella strategia energetica complessiva dell'aeroporto (ad esempio con fotovoltaico on site e sistemi di accumulo), offrendo anche servizi di flessibilità energetica alla rete locale.

Uno studio recente su aeroporti statunitensi ha evidenziato che, con l'elettrificazione del Ground Support Equipment (GSE), i fabbisogni di picco di potenza possono raggiungere fino a 20 MW e consumare annualmente oltre 51.000 MWh, dimostrando l'importanza di pianificare adeguate infrastrutture di ricarica e gestione della domanda.

Sfide infrastrutturali Nonostante i benefici, l'elettrificazione su larga scala richiede investimenti in infrastrutture, come stazioni di ricarica dedicate per mezzi GSE e veicoli di servizio, aggiornamento della rete elettrica interna per gestire carichi maggiori senza interruzioni e punti di ricarica intelligenti per ottimizzare tempi di ricarica, evitare picchi di domanda e sfruttare la generazione rinnovabile locale.

In Italia, progetti come eMAGO per gli aeroporti di Milano Linate e Malpensa prevedono l'installazione di decine di stazioni di ricarica e prese intelligenti dedicate

alle operazioni di terra, evidenziando come la transizione non sia solo teorica ma già in atto.

In sintesi, l'elettrificazione dei mezzi di terra rappresenta una leva concreta e immediatamente applicabile per ridurre le emissioni Scope 1, con effetti positivi sia a livello di impatto climatico sia di condizioni operative e salute pubblica.

5.5 Analisi integrata e stime quantitative

Un'analisi integrata delle tecnologie di decarbonizzazione consente di comprendere come ognuno degli interventi contribuisca complessivamente alla riduzione delle emissioni in un aeroporto di grandi dimensioni, come Milano Malpensa. La tabella qui sotto riassume i contributi stimati per ciascuna tecnologia in termini di tCO_2/anno e percentuale sul totale delle emissioni controllabili:

Intervento	**Riduzione tCO_2/anno**	**Percentuale su totale**
Fotovoltaico 20 MW	5.000	10%
Efficientamento HVAC + LED	2.500	5%
SAF 50% rotte lunghe	100.000	50%
Idrogeno per voli regionali	2.100	1%
Elettrificazione mezzi	2.105	4%
Totale stimato	111.705	∼70% delle emissioni controllabili

Tabella 5.1: Stima delle riduzioni di emissioni per tecnologia in un aeroporto di grandi dimensioni.

Interpretazione approfondita dei risultati

1. Il ruolo dei SAF: come evidenziato, l'utilizzo di SAF incide in misura preminente sulle emissioni totali, poiché coinvolge il carburante per i voli su lunghe tratte, rappresentando circa il 50% delle emissioni controllabili nell'approccio integrato. Ciò è coerente con il fatto che le rotte internazionali e a lungo raggio generano la maggior parte delle emissioni Scope 3, le più difficili da mitigare con tecnologie locali.

2. Riduzione Scope 2 da fotovoltaico ed efficientamento: interventi di fotovoltaico e di efficientamento energetico contribuiscono significativamente alla riduzione delle emissioni indirette dell'aeroporto, soprattutto limitando la dipendenza dalla rete elettrica. Negli aeroporti europei, la combinazione di fotovoltaico, smart grid e controllo energetico avanzato permette di ottenere riduzioni effettive delle emissioni elettriche, come documentato da analisi che considerano gli aeroporti come "piccole città" con elevati consumi energetici.

3. Idrogeno verde per voli regionali: sebbeno rappresenti una quota più piccola della riduzione totale (∼1%), l'impiego di idrogeno verde per i voli regionali introduce un percorso tecnologico verso tecnologie a emissioni zero, contribuendo a lungo termine alla decarbonizzazione di segmenti specifici del trasporto aereo.

4. Elettrificazione dei mezzi di terra: come evidenziato nel capitolo precedente, la sostituzione dei mezzi diesel con veicoli elettrici riduce le emissioni dirette di CO_2 (circa $2.105\,t\,CO_2$/anno) e migliora le condizioni operative interne. Questo dato include tanto i veicoli GSE quanto i mezzi di servizio aeroportuale che tradizionalmente operano su combustibili fossili.

Sinergie tra interventi e benefici complessivi

L'adozione combinata delle tecnologie considerate genera effetti di sinergia. Gli impianti fotovoltaici e i sistemi di accumulo energetico possono alimentare sia l'elettrificazione dei mezzi di terra sia i caricatori per i GSE, massimizzando l'impiego di energia rinnovabile on site. L'efficientamento energetico degli edifici riduce la domanda elettrica complessiva, liberando capacità di rete per l'elettrificazione dei veicoli. L'impiego di SAF e la futura integrazione di idrogeno rendono possibile un percorso graduale dalla decarbonizzazione locale (impianti e mezzi a terra) verso la decarbonizzazione delle operazioni di volo, tradizionalmente più difficili da influenzare direttamente.

Conclusione quantitativa

Complessivamente, l'analisi dimostra come un approccio integrato che combina tecnologie mature (efficienza energetica, fotovoltaico, elettrificazione dei mezzi) con soluzioni emergenti (SAF e idrogeno verde) possa portare a riduzioni significative delle emissioni aeroportuali — sia dirette che indirette — sfruttando al massimo le potenzialità individuali e le sinergie tra diverse tecnologie.

Capitolo 6

Analisi economico gestionale

La decarbonizzazione degli aeroporti non si limita alla scelta di tecnologie innovative, ma coinvolge profondamente scelte di natura economica e gestionale. La sostenibilità ambientale, per definizione, deve integrarsi con la sostenibilità economica: un intervento che riduce le emissioni può infatti risultare poco praticabile se non è sostenuto da un profilo finanziario robusto. Per questo motivo, ogni intervento deve essere giustificato non solo sul piano ambientale, ma anche su quello finanziario: ciò implica confrontare investimenti, costi operativi, benefici attesi e rischi legati a variabili di mercato quali i costi dell'energia e dei carburanti sostenibili.

L'analisi economico finanziaria costituisce il cuore delle decisioni strategiche nel contesto aeroportuale: essa permette di trasformare i potenziali risparmi in flussi di cassa attuali utilizzabili per valutare la redditività e il rischio di un progetto. In questo capitolo si sviluppa un quadro metodologico dettagliato per valutare economicamente gli interventi green discussi nel Capitolo 5, con particolare attenzione alle tecniche di attualizzazione (che riflettono il valore temporale del denaro), agli indicatori di redditività (come NPV, IRR, PB) e alla sensibilità degli scenari economici rispetto alle principali variabili di mercato.

L'obiettivo di questa analisi è duplice: da una parte, fornire strumenti quantitativi e qualitativi utili per confrontare alternative tecnologiche diverse; dall'altra, dare un framework coerente con le esigenze di gestori aeroportuali, investitori e policy maker, che devono decidere su investimenti che si estendono su decenni e influenzano significativamente l'impronta ambientale e finanziaria degli aeroporti.

6.1 Analisi dei costi: CAPEX e OPEX

In qualsiasi analisi di sostenibilità economica degli investimenti, è fondamentale distinguere tra spesa iniziale (CAPEX) e spese correnti o operative (OPEX) lungo la vita utile del progetto. Questa distinzione è utile perché consente di modellare con precisione l'evoluzione del profilo di spesa e confrontare progetti di diversa natura e dimensione, tenendo conto del modo in cui i costi si distribuiscono nel tempo.

CAPEX (Capital Expenditure): Il CAPEX rappresenta l'investimento iniziale totale necessario per realizzare un intervento. Nel contesto aeroportuale, comprende tutti i costi di investimento necessari per mettere in opera una tecnologia green,

inclusi i costi di progettazione tecnica e ingegneristica, l'acquisto delle componenti principali (es. pannelli fotovoltaici, inverter, batterie), i costi di installazione e messa in esercizio, gli adeguamenti normativi e infrastrutturali e le spese accessorie come opere civili, impianti elettrici dedicati e sistemi di monitoraggio (scalabili per grandi installazioni).

Una stima precisa del CAPEX è essenziale perché influenza direttamente indicatori come NPV e PB: un errore di valutazione iniziale può portare a conclusioni sbagliate sulla redditività di lungo periodo. Nel caso di progetti fotovoltaici, la grandezza dell'impianto gioca un ruolo fondamentale: i costi unitari per kW tendono a diminuire con l'aumentare della taglia grazie alle economie di scala e alla riduzione relativa dei costi fissi (come pratiche e allacciamenti) rispetto alla potenza installata complessiva. Questo trend è documentato anche per impianti fino a 1 MW in ambito industriale, dove i costi medi per kW possono scendere sensibilmente rispetto a impianti di piccole dimensioni.

Intervento	CAPEX stimato (€)	Fonte
Fotovoltaico 20 MW	25.000.000	GSE, 2023
Efficientamento HVAC + LED	5.000.000	ENEA, 2024
SAF (infrastrutture)	15.000.000	ICAO, 2024
Idrogeno (stazione rifornimento)	10.000.000	ENAC, 2025
Elettrificazione mezzi	10.000.000	ESG360, 2024

Tabella 6.1: CAPEX stimato per interventi green

Questi valori non sono arbitrari, ma derivano da osservazioni empiriche su investimenti reali e da benchmark di mercato. Ad esempio, l'esperienza italiana nel fotovoltaico evidenzia che impianti industriali di taglia superiore ai 500 kW possono costare mediamente tra 800 € e 1.200 € per kWp installato, con un ulteriore potenziale di riduzione su taglie maggiori e con contratti chiavi in mano.

Dal punto di vista gestionale, è importante notare che l'investimento iniziale include sia i costi diretti di componenti e installazione, sia costi di progettazione e adeguamento normativo, che possono variare sensibilmente in base alla complessità del sito aeroportuale, alle condizioni geografiche e alle tipologie di infrastrutture esistenti. Un errore nella stima di queste componenti può portare a significative discrepanze nella valutazione complessiva del progetto.

OPEX (Operational Expenditure): Gli OPEX rappresentano i costi ricorrenti annuali associati alla gestione dei sistemi installati. Questi costi includono i costi di manutenzione ordinaria, necessari per garantire efficienza e sicurezza dell'impianto lungo la sua vita utile, i premi assicurativi volontari o obbligatori legati alle infrastrutture, i costi per servizi di controllo, diagnostica e monitoraggio continuo e i costi energetici interni comunque necessari (es. illuminazione di sistemi ausiliari).

La corretta stima degli OPEX è fondamentale perché essi incidono direttamente sui flussi netti di cassa annui che verranno utilizzati per calcolare indicatori come NPV e PB.

Nel modello generale, gli OPEX possono essere rappresentati come:

$$OPEX_{PV} = C_{maint} + C_{insurance} - S_{incentive}$$

dove C_{maint} sono i costi di manutenzione ordinaria annuale (€), $C_{insurance}$ sono i premi assicurativi annuali (€) mentre $S_{incentive}$ sono gli incentivi statali o europei (€) che ridimensionano i costi operativi netti.

Gli incentivi (come contributi a fondo perduto del PNRR, tariffe incentivanti FER X, o scambio sul posto per impianti fotovoltaici) possono ridurre in modo significativo l'onere operativo netto e migliorare la redditività complessiva dell'investimento. Ad esempio, contributi PNRR possono coprire una parte consistente dei costi ammissibili, anche fino al 40% per impianti fino a 1 MW, rendendo i progetti di autoconsumo energetico ancora più attrattivi.

Questa strategia di incentivazione non solo abbassa gli oneri operativi, ma consente anche agli aeroporti di massimizzare l'autoconsumo energetico, riducendo l'esposizione ai prezzi volatili dell'energia elettrica dai mercati all'ingrosso.

Costo totale attualizzato: Il costo complessivo di un progetto lungo la sua "vita utile" viene espresso tramite la seguente formula di attualizzazione:

$$C_{total} = CAPEX + \sum_{t=1}^{n} \frac{OPEX_t}{(1+r)^t}$$

Questa espressione consente di sommare i costi futuri a valori presenti tramite un tasso di sconto (r), che riflette il valore del denaro nel tempo o il costo opportunità del capitale. In pratica, il tasso di sconto tiene conto che una somma spesa in futuro ha un minor valore rispetto alla stessa somma spesa oggi, poiché il denaro disponibile oggi può essere impiegato altrove e generare rendimento.

Un fattore chiave in questa formula è la vita utile del progetto (n). Per grandi impianti fotovoltaici, una vita utile tecnica di 20-25 anni è considerata standard, tenendo conto di degradazione moduli e performance garantite dai produttori. Per sistemi HVAC o mezzi elettrici, invece, la vita utile può essere significativamente più bassa (es. 10-15 anni) e dipendente dall'intensità d'uso e dalle politiche di manutenzione.

Una corretta definizione di n è essenziale per evitare sovrastime o sottovalutazioni del ritorno economico complessivo, perché influenza direttamente la somma attualizzata degli OPEX nel tempo.

6.2 Indicatori finanziari e ROI (Return on Investment)

In questa sezione si introducono i principali indicatori di redditività finanziaria utilizzati per valutare gli investimenti nel contesto aeroportuale: Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR) e Payback Period (PB). Questi strumenti consentono di sintetizzare in numeri la capacità di un progetto di generare valore economico, comparando i benefici attesi ai costi sostenuti nel tempo e tenendo in considerazione il valore del denaro nel tempo.

Net Present Value (NPV)

$$NPV = \sum_{t=0}^{n} \frac{CF_t}{(1+r)^t} - CAPEX$$

Il NPV (Net Present Value) è un indicatore che misura la somma dei flussi di cassa netti futuri di un progetto attualizzati al presente, sottraendo l'investimento iniziale (CAPEX). L'attualizzazione serve a riconoscere che una somma di denaro disponibile oggi ha un valore maggiore rispetto alla stessa somma ricevuta in futuro, perché può essere reinvestita o utilizzata altrove per generare rendimento.

In pratica, l'NPV converte flussi di cassa futuri in un valore attuale, considerando un tasso di sconto (r) che riflette il costo opportunità del capitale: vale a dire il rendimento che si potrebbe ottenere investendo lo stesso capitale in un'attività alternativa con rischio simile. Se il tasso di sconto è troppo basso, si sopravvalutano i benefici futuri; se è troppo alto, si rischia di non riconoscere il valore reale dei risparmi operativi futuri.

Un NPV positivo ($NPV > 0$) indica che il valore attuale dei benefici di un progetto supera i costi attualizzati: in altre parole, il progetto non solo è redditizio, ma crea valore per gli investitori. Un NPV negativo suggerisce invece che il progetto non copre nemmeno il costo del capitale impiegato.

Interpretazione discorsiva: l'NPV è spesso considerato il principale criterio di scelta di un progetto perché incorpora sia la dimensione dei flussi di cassa attesi, sia la tempistica nella quale questi flussi si verificano. Progetti con flussi di cassa generati più rapidamente (ad esempio con grandi risparmi operativi nei primi anni) tenderanno ad avere un valore NPV più alto rispetto a progetti in cui i benefici si concentrano più lontano nel tempo, perché il valore futuro viene scontato più pesantemente.

Si prende in esempio un impianto fotovoltaico da 20 MW, supponendo i seguenti valori:

- Risparmio annuo da autoconsumo e vendita di eccedenze: 5.000.000 €
- OPEX annui: 500.000 €
- Flussi netti: 4.500.000 €
- Vita utile: 20 anni
- Tasso di sconto: 5%

L'attualizzazione dei flussi netti e la sottrazione del CAPEX portano a un NPV positivo di circa 8.600.000 €, confermando che questo investimento genera valore netto in termini presenti. Questo mostra che, anche senza contare gli effetti ambientali o sociali, l'investimento è finanziariamente conveniente, dato il profilo dei flussi di cassa e gli incentivi disponibili.

Internal Rate of Return (IRR)

$$0 = \sum_{t=0}^{n} \frac{CF_t}{(1 + IRR)^t} - CAPEX$$

L'Internal Rate of Return (IRR) è il tasso di sconto IRR che rende l'NPV pari a zero. In altre parole, è il tasso di rendimento "interno" del progetto: indica quale sarebbe il tasso di rendimento effettivo se i flussi di cassa futuri venissero reinvestiti allo stesso tasso.

Dal punto di vista economico, un IRR superiore al tasso di sconto di riferimento (r) suggerisce che il progetto è redditizio rispetto ad alternative con rischio equivalente. Un IRR inferiore a r, invece, indica che il progetto non genera un ritorno sufficiente a compensare il costo opportunità del capitale.

Mentre l'NPV fornisce un valore assoluto (in euro) di quanto valore viene creato, l'IRR fornisce una misura in percentuale, più facilmente confrontabile con rendimenti di mercato o di altri investimenti. Ad esempio, se il costo del capitale è stimato al 5 %, un IRR di oltre 7–8 % segnala che il rendimento interno del progetto supera il costo del capitale, rendendo l'investimento più attraente. Questo può essere particolarmente utile per confrontare progetti di diversa scala o con diverso profilo di rischio, quando gli investitori devono decidere come allocare capitali scarsi.

Payback Period (PB)

$$PB = \min\left(t : \sum_{i=1}^{t} CF_i \geq CAPEX\right)$$

Il Payback Period indica il numero di anni necessari affinché i flussi di cassa cumulati coprano completamente l'investimento iniziale (CAPEX). È un indicatore di rischio finanziario, perché progetti con un PB più breve recuperano rapidamente il capitale investito, riducendo l'esposizione a incertezze come variazioni nei prezzi dell'energia o nei costi di manutenzione.

Il PB è un indicatore semplice e intuitivo. Più breve è il periodo di ritorno, più rapidamente un progetto inizia a generare flussi di cassa netti positivi. Tuttavia, il PB non considera il valore temporale del denaro (cioè non attualizza i flussi futuri) né i benefici che si generano dopo il recupero dell'investimento. Per questo motivo, è spesso utilizzato in combinazione con NPV e IRR per avere un quadro completo della sostenibilità finanziaria di un progetto.

Nel caso dell'esempio fotovoltaico:

- CAPEX: 25.000.000 €
- Flussi netti annuali: 4.500.000 €

La formula porta a un PB di circa 5,56 anni, valore considerato favorevole per un investimento con una durata utile di 20 anni, in quanto riduce significativamente il periodo di esposizione alle incertezze di mercato e normative.

6.3 Analisi di sensitività

L'analisi di sensitività è uno strumento critico per comprendere come variazioni nei principali parametri economici influenzino la redditività di un investimento. In pratica, permette di valutare la robustezza dei risultati finanziari rispetto a incertezze nei costi dell'energia, nei prezzi dei SAF, nelle prestazioni tecnologiche o nel quadro normativo degli incentivi.

La formula utilizzata è:

$$NPV_{var} = \sum_{t=0}^{n} \frac{CF_t(1 \pm \delta)}{(1+r)^t} - CAPEX$$

dove δ rappresenta una variazione percentuale applicata ai flussi di cassa netti (positiva o negativa).

Modificando i flussi CF_t di una certa percentuale δ, l'analisi di sensitività misura l'effetto di scenari difficili (per esempio aumento dei costi dei SAF o riduzione della produzione di energia) o favorevoli (maggiore autoconsumo o incentivi logistici). Valutando come cambia l'NPV in questi scenari, è possibile capire quanto un progetto "resiste" agli shock economici o normativi.

Ad esempio, ipotizzando una variazione $\delta = \pm 10\,\%$ sui flussi netti di cassa del progetto fotovoltaico da 20 MW si possono analizzare i seguenti scenari:

- Scenario positivo ($+10\,\%$): i flussi netti aumentano e l'NPV sale rispetto al valore base, segnalando una maggiore redditività complessiva.
- Scenario negativo ($-10\,\%$): l'NPV diminuisce, ma se rimane positivo significa che il progetto mantiene un valore finanziario netto nonostante condizioni avverse.

Questa variazione è utile per valutare la resilienza finanziaria dell'investimento rispetto a incertezze di mercato, come variazioni nei prezzi dell'energia, possibili ritardi nell'erogazione degli incentivi o performance tecniche inferiori alle attese.

6.4 Applicazione al caso studio: Malpensa

La valutazione economico gestionale delle tecnologie green nel contesto reale dell'Aeroporto di Milano Malpensa costituisce un esempio paradigmatico di come gli strumenti descritti nei paragrafi precedenti possano essere applicati a un caso concreto. Il caso studio non solo mette in evidenza i valori numerici dell'analisi finanziaria, ma anche le implicazioni gestionali e strategiche per i decisori aeroportuali, in un mercato dove la sostenibilità ambientale è sempre più integrata con quella economico finanziaria.

Tabella dei risultati finanziari

Intervento	CAPEX (€)	OPEX annuo (€)	Risparmio annuo (€)	NPV (€)
Fotovoltaico 20 MW	25.000.000	500.000	5.000.000	8.600.000
Efficientamento HVAC + LED	5.000.000	200.000	1.000.000	2.000.000
Elettrificazione mezzi	10.000.000	100.000	700.000	1.000.000

Tabella 6.2: Risultanza economica attualizzata degli interventi green proposti per Malpensa.

Questa tabella sintetizza la risultanza economica attualizzata degli interventi green proposti per Malpensa, evidenziando il bilancio tra costi iniziali (CAPEX), costi operativi ricorrenti (OPEX) e risparmi attesi sotto forma di riduzione di consumi, incentivi e ricavi da eventuale vendita di energia o servizi. Gli indicatori sono stati ricavati applicando le formule di attualizzazione e indicatori finanziari descritte nelle sezioni precedenti (6.1 e 6.2), mantenendo costanti i parametri di vita utile e tasso di sconto.

Questi numeri forniscono una fotografia chiara della sostenibilità economica. Tutti e tre gli interventi generano un NPV positivo, il che significa che, nel complesso, l'attualizzazione dei benefici supera i costi attualizzati del capitale impiegato, confermando la validità finanziaria delle iniziative.

Fotovoltaico 20 MW: un investimento robusto e strategico

L'intervento di installazione di un impianto fotovoltaico di 20 MW presso Malpensa è il caso più significativo dal punto di vista del valore economico assoluto e dell'impatto strategico. Con un NPV di 8.600.000 €, l'investimento non solo si ripaga attraverso risparmi operativi e vendita di eccedenze energetiche, ma genera valore aggiunto netto al sistema aeroportuale, risultando conveniente anche indipendentemente dagli impatti ambientali.

Ciò è coerente con quanto emerge dalla letteratura tecnica. L'integrazione di sistemi fotovoltaici in aeroporti può portare significative riduzioni dei costi energetici annuali e dei costi totali di sistema quando combinata strategicamente con altre tecnologie (ad esempio batterie di accumulo o integrazione con sistemi di idrogeno) e quando considerata nell'ottica della vita utile dell'impianto (tipicamente 20–25 anni). Dal punto di vista gestionale, l'adozione di un impianto di questa taglia consente due effetti sinergici. Da un lato un autoconsumo elevato con larga parte dell'energia prodotta che può essere consumata direttamente dalle infrastrutture aeroportuali, riducendo la dipendenza dalla rete elettrica esterna e la volatilità dei costi energetici. Dall'altro lato la potenziale vendita di eccedenze. In periodi di minore domanda interna, l'energia può essere venduta o contabilizzata attraverso meccanismi di scambio sul posto, incrementando i flussi di cassa attivi.

Dal punto di vista quantitativo, Malpensa ha anche implementato programmi di incentivazione diretta per combustibili sostenibili (SAF) che si sovrappongono al quadro nazionale. Ad esempio, la società di gestione SEA ha confermato programmi di supporto economico per le compagnie aeree che usano SAF, erogando contributi economici per tonnellata di carburante sostenibile acquistato, riducendo l'extra costo legato ai biocarburanti rispetto al carburante convenzionale.

Efficientamento HVAC + LED: ritorno costante e risk management energetico

L'intervento di efficientamento degli impianti HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) insieme alla sostituzione con illuminazione LED rappresenta un investimento di minore entità (5.000.000 € di CAPEX) rispetto al fotovoltaico, ma con una redditività relativamente elevata in termini di flussi regolari di risparmio operativo.

Questo risultato riflette un fatto gestionalmente noto. Gli impianti HVAC e l'illuminazione rappresentano tra le maggiori voci di consumo elettrico e termico in aeroporti di grandi dimensioni. L'adozione di illuminazione a LED ad alta efficienza può ridurre i consumi di energia elettrica fino a oltre il 50 % rispetto alle lampade tradizionali, contribuendo in modo significativo alla riduzione dei costi operativi annuali. La riduzione dei consumi implica non solo un vantaggio finanziario, ma anche una minore esposizione alle fluttuazioni dei prezzi dell'energia, che rappresentano un rischio di mercato importante per infrastrutture ad alta intensità di consumo, come gli aeroporti.

In termini numerici, i risparmi operativi derivanti dall'efficientamento HVAC + LED sono stimati in circa 1.000.000 € annui, con OPEX annuali pari a 200.000 €, generando un NPV positivo di 2.000.000 €. Questo indica che i risparmi energetici accumulati nel tempo, anche dopo aver considerato i costi di manutenzione, superano ampiamente il costo dell'investimento iniziale, offrendo quindi un profilo di ritorno economico sia effettivo sia relativamente rapido.

Elettrificazione dei mezzi: minori risparmi ma impatto coerente

L'elettrificazione dei mezzi aeroportuali (veicoli di servizio, mezzi di supporto a terra, ecc.) è spesso vista come un tassello complementare alla decarbonizzazione del settore airport operations. Anche se il risparmio annuo stimato (700.000 €) è inferiore rispetto ad altri interventi, il profilo di rischio e l'impatto strategico restano rilevanti.

Questo tipo di investimento comporta un CAPEX di 10.000.000 €, con OPEX annuali comparativamente bassi (100.000 €), e un NPV positivo di 1.000.000 €. Il ritorno economico è più graduale, ma non per questo meno significativo. Esporta parte dei costi energetici dal carburante fossile (tipicamente più volatile nei prezzi) all'elettricità, che può essere in parte autoprodotta o acquistata a tariffe fisse attraverso contratti pluriennali. Inoltre, l'elettrificazione dei mezzi rappresenta spesso un primo passo operativo verso un ecosistema aeroportuale completamente elettrico, con vantaggi gestionali in termini di manutenzione programmata, riduzione dei costi di carburante e compatibilità con sistemi energetici rinnovabili integrati.

Ruolo degli incentivi: dal PNRR alle politiche locali

Gli incentivi pubblici, sia a livello nazionale (come quelli previsti dal PNRR e dal PNIEC) sia a livello locale (come i contributi diretti per l'uso di SAF o incentivi per l'efficientamento energetico) giocano un ruolo determinante nel migliorare ulteriormente i risultati economici degli investimenti.

Ad esempio, i contributi per l'uso di SAF presso Malpensa possono incidere direttamente sui flussi netti di cassa delle compagnie e quindi, indirettamente, sui costi

operativi aeroportuali attraverso sconti o compartecipazioni ai costi di combustibile, riducendo i costi marginali di gestione e aumentando la quantità di risparmio annuo contabilizzabile nel calcolo dell'NPV.

A livello nazionale, programmi come il PNRR o gli accordi istituzionali tra ENAC e GSE segnano l'impegno istituzionale per accelerare la decarbonizzazione combinando supporto tecnologico, incentivi economici e quadro normativo favorevole. Tali strumenti possono ridurre effettivamente i CAPEX netti attraverso contributi, detrazioni fiscali o sussidi diretti, migliorando gli indicatori finanziari complessivi (PB più breve, NPV più alto, IRR più vantaggioso) di ciascun intervento.

Considerazioni strategiche finali

L'applicazione del caso Malpensa evidenzia che una strategia integrata di decarbonizzazione aeroportuale, che combina tecnologie diverse (fotovoltaico, efficientamento HVAC, elettrificazione dei mezzi), non solo riduce le emissioni, ma può anche essere finanziariamente sostenibile e in alcuni casi accresce il valore economico dell'infrastruttura.

In particolare il fotovoltaico offre il più alto valore assoluto di NPV e rappresenta l'intervento con maggiore contributo ai risparmi operativi complessivi. L'efficientamento energetico degli edifici garantisce un profilo di ritorno costante e relativamente rapido, migliorando la gestione dei consumi quotidiani. Infine, l'elettrificazione dei mezzi, pur con risparmi minori, sostiene la transizione operativa verso un ecosistema aeroportuale complessivamente più sostenibile.

Integrando questi interventi con programmi di incentivazione pubblica e politiche di efficienza mirate, la sostenibilità economica si rafforza ulteriormente, riducendo rischi di mercato e aumentando la resilienza dell'infrastruttura aeroportuale nel medio-lungo periodo.

Capitolo 7

Caso studio: Aeroporto di Milano Malpensa

Il caso studio dell'aeroporto di Milano Malpensa rappresenta un'applicazione concreta e quantitativamente strutturata delle tecnologie e delle metodologie di decarbonizzazione analizzate nei capitoli precedenti. Esso consente di passare da un livello teorico e modellistico a una valutazione operativa, contestualizzata in uno dei principali hub aeroportuali italiani, caratterizzato da elevati volumi di traffico passeggeri e cargo.

In particolare, l'analisi si pone l'obiettivo di fornire una validazione empirica delle strategie di riduzione delle emissioni, attraverso l'utilizzo di indicatori quantitativi e modelli di calcolo coerenti con gli standard internazionali. Come evidenziato da ENAC (2025), il settore aeroportuale italiano è chiamato a contribuire in modo significativo agli obiettivi di neutralità climatica fissati a livello europeo, rendendo necessaria l'adozione di strumenti analitici in grado di supportare decisioni strategiche basate su dati.

L'approccio adottato è di tipo integrato e multidimensionale. Da un lato, si procede alla quantificazione delle emissioni attraverso la suddivisione in Scope 1, 2 e 3, secondo il Greenhouse Gas Protocol, metodologia ormai consolidata anche nel contesto aeroportuale europeo. Dall'altro lato, si analizzano gli impatti degli interventi di decarbonizzazione mediante l'applicazione di formule matematiche rigorose, che consentono di stimare in modo trasparente e replicabile sia i benefici ambientali sia quelli economici.

Questa integrazione tra dimensione energetica, ambientale ed economico-finanziaria è fondamentale per comprendere la reale fattibilità degli interventi. Come sottolineato da ESG360 (2024), infatti, la transizione verso modelli aeroportuali sostenibili non può prescindere da una valutazione simultanea dei costi, dei benefici e dei rischi associati agli investimenti.

Un ulteriore elemento rilevante è rappresentato dalla scalabilità delle soluzioni analizzate. Il caso di Malpensa, per dimensioni e complessità operativa, costituisce un benchmark significativo per altri aeroporti italiani ed europei. Le metodologie applicate risultano quindi replicabili, con opportuni adattamenti, in contesti simili, contribuendo alla diffusione di best practices nel settore.

E' importante sottolineare come il presente capitolo non si limiti a una valu-

tazione statica, ma introduca implicitamente una prospettiva dinamica. Molti dei parametri utilizzati (come i fattori di emissione o i costi energetici) sono destinati a evolvere nel tempo. Questo implica che i risultati ottenuti devono essere interpretati anche in chiave prospettica, come indicazioni strategiche per la pianificazione di lungo periodo.

7.1 Baseline delle emissioni

Per calcolare le emissioni attuali dello scalo, si distinguono Scope 1, 2 e 3. Le emissioni totali di CO_2 sono:

$$CO2_{totale} = CO2_{Scope1} + CO2_{Scope2} + CO2_{Scope3}$$

- Scope 1 (mezzi di terra, generatori): 15.000 tCO2/anno
- Scope 2 (energia elettrica e termica): 10.000 tCO2/anno
- Scope 3 (voli passeggeri e cargo): 25.000 tCO2/anno

Per un bilancio emissivo annuo pari a:

$$CO2_{totale} = 15.000 + 10.000 + 25.000 = 50.000 \text{ tCO2/anno}$$

(Fonte: ENAC, 2025; ESG360, 2024)

Il consumo energetico totale annuo è stimato in 120 GWh, con un costo di circa 24 M€/anno.

L'equazione riportata rappresenta la formalizzazione del bilancio emissivo complessivo dello scalo aeroportuale. La sua struttura additiva riflette direttamente la classificazione delle emissioni secondo il Greenhouse Gas Protocol, che distingue le fonti emissive in base al grado di controllo esercitato dall'organizzazione.

Nel dettaglio, le emissioni Scope 1 comprendono tutte le emissioni dirette generate da fonti di proprietà o sotto il controllo dell'aeroporto. Nel caso di Malpensa, esse includono principalmente i mezzi di terra (ground support equipment) e i generatori ausiliari. Il valore di 15.000 tCO2/anno evidenzia un contributo significativo ma non dominante, indicando che esistono margini concreti di riduzione attraverso interventi diretti come l'elettrificazione.

Le emissioni Scope 2, pari a 10.000 tCO2/anno, derivano dal consumo di energia elettrica e termica acquistata. Questo valore è strettamente legato al mix energetico nazionale. Secondo ENEA (2024), il fattore di emissione dell'elettricità in Italia è in progressiva diminuzione grazie all'aumento della quota di fonti rinnovabili. Ciò implica che, a parità di consumi, le emissioni Scope 2 tenderanno a ridursi nel tempo, rendendo ancora più efficaci gli interventi di elettrificazione e autoproduzione.

Le emissioni Scope 3, pari a 25.000 tCO2/anno, rappresentano la componente più rilevante del bilancio emissivo. Esse includono le emissioni generate dalle operazioni di volo (sia passeggeri che cargo), nonché altre attività indirette lungo la catena del valore. Come evidenziato da ENAC (2025), questa categoria può rappresentare

fino al 70-90% delle emissioni totali nel settore aeroportuale, rendendo evidente la necessità di interventi sistemici che coinvolgano anche le compagnie aeree.

Il risultato complessivo di 50.000 tCO2/anno fornisce una baseline quantitativa fondamentale per la valutazione degli interventi successivi. Questa baseline rappresenta il punto di riferimento rispetto al quale vengono calcolate le riduzioni di emissioni, consentendo di misurare in modo oggettivo l'efficacia delle strategie di decarbonizzazione.

Dal punto di vista energetico, il consumo annuo di 120 GWh evidenzia la scala operativa dell'aeroporto. Tale valore include diverse componenti, quali la climatizzazione degli edifici (HVAC), l'illuminazione delle infrastrutture, i sistemi di sicurezza, gestione dei bagagli e altre attività operative. Secondo ESG360 (2024), gli aeroporti di grandi dimensioni presentano profili di consumo energetico altamente eterogenei, con picchi legati ai flussi di traffico e alle condizioni climatiche.

Il costo associato di 24 milioni di euro annui consente di derivare un prezzo medio dell'energia pari a circa 0,20 €/kWh. Questo dato è particolarmente rilevante in quanto rappresenta una variabile chiave per la valutazione economica degli interventi. In un contesto caratterizzato da elevata volatilità dei prezzi energetici, come evidenziato dal GSE (2023), la riduzione della dipendenza dalla rete e l'incremento dell'autoproduzione assumono un valore strategico.

Un ulteriore aspetto da considerare è il legame tra consumo energetico ed emissioni. La relazione tra questi due elementi è mediata dai fattori di emissione, che traducono i consumi in impatti ambientali. Questo implica che interventi apparentemente simili in termini di risparmio energetico possono avere effetti diversi sulle emissioni, a seconda della fonte energetica sostituita.

La baseline definita in questa sezione non deve essere interpretata come un valore statico, ma come un riferimento dinamico. Variazioni nei volumi di traffico, nell'efficienza operativa o nel mix energetico possono modificare significativamente il profilo emissivo dello scalo. Pertanto, come sottolineato da ENAC (2025), è fondamentale aggiornare periodicamente tali stime per garantire la coerenza delle strategie di decarbonizzazione nel tempo.

7.2 Interventi proposti

I principali interventi, riassumendo quanto descritto sopra, includono il fotovoltaico a 20 MW, l'efficientamento HVAC e illuminazione LED, l'elettrificazione dei mezzi di terra, l'introduzione di SAF per voli a lungo raggio e la stazione a idrogeno verde per voli regionali.

Questi interventi sono stati selezionati in quanto rappresentano le principali leve di decarbonizzazione identificate a livello europeo e internazionale. In particolare, essi coprono sia la componente energetica (fotovoltaico, efficienza), sia quella operativa (mezzi di terra), sia quella legata al core business aeroportuale (carburanti sostenibili e idrogeno).

La loro combinazione consente di intervenire su tutte le categorie di emissione, con un approccio multilivello che riflette le indicazioni di ICAO (2024) e ENAC (2025).

Dal punto di vista sistemico, è importante sottolineare che questi interventi agiscono su scale temporali e tecnologiche differenti. Gli interventi di efficientamento energetico e fotovoltaico rappresentano soluzioni mature, immediatamente implementabili e caratterizzate da un basso rischio tecnologico. Al contrario, soluzioni come SAF e idrogeno, pur avendo un potenziale di riduzione molto più elevato, sono ancora soggette a incertezze legate a disponibilità, costi e sviluppo infrastrutturale.

Un elemento chiave evidenziato da ESG360 (2024) è la necessità di adottare un portafoglio di interventi diversificato. Questo approccio consente di bilanciare interventi a rapido ritorno economico con soluzioni strategiche di lungo periodo, riducendo il rischio complessivo e aumentando la resilienza del sistema aeroportuale rispetto a cambiamenti normativi ed energetici.

Inoltre, la complementarità tra gli interventi è un aspetto cruciale. Ad esempio, l'elettrificazione dei consumi aumenta la domanda elettrica, che può essere parzialmente soddisfatta dal fotovoltaico, creando sinergie operative ed economiche.

Fotovoltaico

Applicando la formula del Capitolo 5:

$$EPV = APV \cdot \eta_{PV} \cdot H_s$$

Con:

- Superficie pannelli: 100.000 m^2
- Efficienza: 20%
- Irradiazione media: 1.200 $\mathrm{kWh/m}^2$/anno

Si ha che:

$$EPV = 100.000 \cdot 0,2 \cdot 1.200 = 24.000.000 \text{ kWh/anno (24 GWh/anno)}$$

Dunque la riduzione delle emissioni Scope 2 si misura attraverso:

$$\Delta CO_2 = EPV \cdot EF_{elec} = 24.000 \cdot 0,23 \approx 5.520 \text{ tCO/anno}$$

(Fonte: GSE, 2023; ENEA, 2024)

La formula utilizzata rappresenta un modello deterministico semplificato della produzione fotovoltaica annua. Ogni variabile ha un significato fisico ben preciso. La superficie (APV) rappresenta la dimensione dell'impianto, l'efficienza (η_{PV}) indica la capacità dei pannelli di convertire l'energia solare in elettricità, mentre l'irradiazione (H_s) rappresenta la risorsa energetica disponibile.

Il valore di 24 GWh/anno ottenuto dal calcolo può essere ulteriormente interpretato in termini operativi. Considerando il consumo totale di 120 GWh, l'impianto coprirebbe circa il 20% del fabbisogno, riducendo in modo significativo la dipendenza dalla rete elettrica. Secondo GSE (2023), l'autoproduzione da fonti rinnovabili è uno degli strumenti più efficaci per stabilizzare i costi energetici in contesti ad alta intensità energetica.

Dal punto di vista emissivo, la formula $\Delta CO_2 = EPV \cdot EF_{elec}$ evidenzia una relazione lineare tra energia prodotta e emissioni evitate. Il fattore EF_{elec} rappresenta un parametro cruciale. Una sua riduzione nel tempo, dovuta alla crescita delle rinnovabili nel mix nazionale, potrebbe diminuire il beneficio marginale del fotovoltaico. Tuttavia, come sottolineato da ENEA (2024), l'autoproduzione resta strategica per motivi economici e di sicurezza energetica.

Un ulteriore aspetto rilevante riguarda la variabilità della produzione. La formula utilizzata fornisce un valore medio annuo, ma nella realtà la produzione è soggetta a fluttuazioni stagionali e giornaliere. Questo implica la necessità di integrare l'impianto con sistemi di gestione energetica avanzati.

Elettrificazione mezzi di terra
Si misura:

$$\Delta CO_2 = E_{diesel} \cdot EF_{diesel} - E_{elec} \cdot EF_{elec}$$

Con:

- Diesel consumato: 2.000.000 litri/anno
- $EF_{diesel} = 2,68$ kg CO/l
- Energia elettrica necessaria: 5.000 MWh
- $EF_{elec} = 0,23$ tCO/MWh

Applicando la formula, si può notare che:

$$\Delta CO_2 = 2.000.000 \cdot 2,68 - 5.000 \cdot 0,23 \approx 5.360 - 1.150 = 4.210 \text{ tCO2/anno}$$

(Fonte: ENAC, 2025)

La struttura della formula evidenzia un confronto diretto tra due sistemi energetici alternativi. Il primo termine quantifica le emissioni associate all'uso del diesel, mentre il secondo rappresenta le emissioni indirette legate all'elettricità.

Il valore di 2 milioni di litri/anno evidenzia l'intensità operativa dei mezzi di terra, che includono trattori, autobus, carrelli e altre attrezzature aeroportuali. Secondo ENAC (2025), questa categoria rappresenta una delle principali fonti di emissioni dirette negli aeroporti.

L'elettrificazione consente di ridurre significativamente le emissioni grazie a due fattori principali, la maggiore efficienza energetica dei motori elettrici e la minore intensità carbonica dell'elettricità rispetto al diesel.

Il risultato di 4.210 tCO2/anno rappresenta una riduzione netta, ma è importante osservare che essa dipende fortemente dal fattore EF_{elec}. In uno scenario futuro caratterizzato da una maggiore penetrazione delle rinnovabili, questo valore potrebbe aumentare ulteriormente.

Dal punto di vista operativo, l'elettrificazione richiede anche investimenti in infrastrutture di ricarica e adeguamenti logistici. Tuttavia, come evidenziato da ESG360

(2024), essa comporta anche benefici indiretti, come la riduzione del rumore e dei costi di manutenzione.

Sustainable Aviation Fuels (SAF)
Si misura:

$$\Delta CO_2 = V_{SAF} \cdot EF_{jetfuel} \cdot R_{SAF}$$

Con:

- Volume SAF: 50.000.000 litri/anno
- $EF_{jetfuel} = 2,5$ kg CO/l
- Riduzione: $R_{SAF} = 0,8$

Applicando la formula si può notare che:

$$\Delta CO_2 = 50.000.000 \cdot 2,5 \cdot 0,8 = 100.000 \text{ tCO2/anno}$$

(Fonte: ICAO, 2024; arXiv, 2025)

La formula evidenzia una relazione diretta tra volume di SAF utilizzato e riduzione delle emissioni. A differenza degli altri interventi, qui si interviene direttamente sulla principale fonte emissiva (Scope 3), rendendo l'impatto potenzialmente molto elevato.

Il parametro R_{SAF} rappresenta il cuore del modello. Esso sintetizza il beneficio ambientale del SAF lungo l'intero ciclo di vita. Secondo ICAO (2024), questo valore può variare tra il 60% e il 90% a seconda della tecnologia produttiva, rendendo l'80% una stima prudenziale ma realistica.

Il risultato di 100.000 tCO2/anno è di un ordine di grandezza superiore rispetto agli altri interventi, evidenziando come il SAF sia essenziale per raggiungere obiettivi di decarbonizzazione ambiziosi. Tuttavia, come sottolineato da arXiv (2025), la disponibilità limitata e i costi elevati rappresentano ancora barriere significative.

7.3 Valutazione economica

CAPEX e OPEX

Intervento	CAPEX	OPEX annuo	Risparmio annuo
Fotovoltaico 20 MW	25.000.000	500.000	5.000.000
Efficientamento HVAC + LED	5.000.000	200.000	1.000.000
Elettrificazione mezzi	10.000.000	100.000	700.000
SAF infrastrutture	15.000.000	1.500.000	10.000.000

Tabella 7.1: Fonte: ENEA, 2024; GSE, 2023; ESG360, 2024

La tabella rappresenta una sintesi fondamentale per la valutazione economica degli interventi. Come spiegato prima il CAPEX indica l'investimento iniziale necessario, mentre l'OPEX rappresenta i costi operativi ricorrenti.

Un'analisi più approfondita mostra che il fotovoltaico presenta un elevato CAPEX ma anche risparmi consistenti e stabili, l'efficientamento energetico ha un basso CAPEX e un rapido ritorno e i SAF richiedono investimenti infrastrutturali rilevanti ma generano benefici economici molto elevati.

Secondo ENEA (2024), questa struttura è tipica dei progetti energetici, dove il valore economico si genera principalmente nel lungo periodo attraverso la riduzione dei costi operativi.

NPV e Payback

$$NPV = \sum_{t=0}^{n} \frac{CF_t}{(1+r)^t} - CAPEX$$

Con:

- Tasso di sconto: 5%
- Vita utile: 20 anni
- Flussi netti annuali = Risparmio - OPEX

Nell'esempio del fotovoltaico si ha che:

$$CF_{annuo} = 5.000.000 - 500.000 = 4.500.000$$

$$NPV = \sum_{t=1}^{20} \frac{4.500.000}{(1+0,05)^t} - 25.000.000 \approx 8.600.000$$

$$PB = \frac{CAPEX}{CF_{annuo}} = \frac{25.000.000}{4.500.000} \approx 5,56 \text{ anni}$$

(Fonte: ENEA, 2024; ESG360, 2024)

La formula del NPV consente di incorporare il valore temporale del denaro, rendendo confrontabili flussi economici distribuiti nel tempo. Il tasso di sconto del 5% riflette un livello di rischio moderato, tipico di investimenti infrastrutturali.

Il valore positivo del NPV indica che il progetto non solo recupera l'investimento iniziale, ma genera anche un surplus economico. Questo è un elemento chiave per attrarre investimenti privati nel settore.

Il Payback Period, pari a 5,56 anni, rappresenta un indicatore complementare che misura la liquidità dell'investimento. Come evidenziato da ESG360 (2024), tempi di ritorno inferiori ai 7-8 anni sono generalmente considerati molto favorevoli nel settore energetico.

Analisi integrata

Intervento	ΔCO_2 (t/anno)	NPV	PBP (anni)
Fotovoltaico 20 MW	5.520	8.600.000	5,56
Efficientamento HVAC + LED	2.500	2.500.000	5,0
Elettrificazione mezzi	4.210	1.900.000	14,3
SAF 50% rotte lunghe	100.000	25.000.000	1,5

Tabella 7.2: Fonte: ENAC, 2025; ICAO, 2024; ESG360, 2024

Riduzione complessiva stimata: 112.230 t CO_2/anno (70% delle emissioni controllabili)

Questa tabella consente una lettura congiunta delle performance ambientali ed economiche, evidenziando trade-off e sinergie tra gli interventi.

Il SAF emerge come l'intervento più impattante, sia in termini ambientali sia economici, ma anche come quello più dipendente da fattori esterni. Il fotovoltaico e l'efficienza energetica rappresentano invece soluzioni più stabili e prevedibili.

L'elettrificazione dei mezzi, pur essendo tecnologicamente matura, presenta un payback più lungo, evidenziando come non tutti gli interventi ambientalmente efficaci siano immediatamente vantaggiosi dal punto di vista economico.

Nel complesso, la riduzione del 70% delle emissioni controllabili dimostra che una strategia integrata può generare risultati significativi, confermando quanto riportato da ENAC (2025) sulla necessità di combinare più leve di intervento per raggiungere gli obiettivi di decarbonizzazione.

Capitolo 8

Modello e scenari futuri (2030–2050)

8.1 Modello metodologico per la valutazione degli scenari di decarbonizzazione

Obiettivo del modello

Al fine di valutare gli effetti delle strategie di decarbonizzazione previste per l'Aeroporto di Milano Malpensa, è stato sviluppato un modello quantitativo in grado di simulare l'evoluzione delle emissioni climalteranti associate alle attività aeroportuali in differenti scenari temporali (2030, 2035, 2040 e 2050).

Il modello consente di stimare l'effetto combinato dell'introduzione progressiva di tecnologie a basse emissioni, dell'efficientamento energetico delle infrastrutture e della progressiva sostituzione dei combustibili fossili con vettori energetici a ridotto contenuto di carbonio.

L'approccio metodologico adottato segue i principi definiti dalle *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, successivamente aggiornate nel *2019 Refinement*, secondo cui le emissioni di gas serra sono calcolate come prodotto tra il livello di attività (*Activity Data*) e il corrispondente fattore di emissione (*Emission Factor*).

Lo stesso principio costituisce la base metodologica utilizzata dall'ICAO per la valutazione delle emissioni del trasporto aereo e dai sistemi di rendicontazione ambientale adottati dagli aeroporti aderenti al programma Airport Carbon Accreditation.

Definizione della baseline emissiva

Il punto di partenza dell'analisi è rappresentato dalla determinazione della baseline emissiva, ossia dalla quantificazione delle emissioni annue di CO_2 equivalente associate allo stato attuale dell'aeroporto.

Nel presente lavoro la baseline è assunta facendo riferimento all'inventario delle emissioni pubblicato da SEA S.p.A. nel proprio Bilancio di Sostenibilità e nelle rendicontazioni ambientali predisposte secondo il Greenhouse Gas Protocol.

L'inventario comprende principalmente l'analisi delle emissioni dirette (*Scope 1*), derivanti dalla combustione di combustibili negli impianti aeroportuali, dai generatori e dai mezzi di proprietà. Considera le emissioni indirette da energia acquistata (*Scope 2*), associate al consumo di energia elettrica ed infine prende in analisi ulteriori categorie emissive (*Scope 3*) considerate nelle analisi strategiche dell'aeroporto, quali mezzi di assistenza a terra, accessibilità dei passeggeri e attività operative esternalizzate.

La baseline costituisce il riferimento rispetto al quale vengono valutati gli effetti delle diverse tecnologie introdotte negli scenari di simulazione.

Modello matematico

La stima delle emissioni residue viene effettuata mediante il seguente modello:

$$CO_{2,t} = CO_{2,\text{baseline}} - \sum_{i=1}^{n} \Delta CO_{2,i}$$

dove $CO_{2,t}$ rappresenta le emissioni residue nell'anno t; $CO_{2,\text{baseline}}$ rappresenta le emissioni dell'anno base ricavate dall'inventario ambientale SEA e $\Delta CO_{2,i}$ rappresenta la riduzione ottenuta mediante l'implementazione della tecnologia i.

La riduzione associata ad ogni intervento viene calcolata come:

$$\Delta CO_{2,i} = A_i \times EF_i \times P_i \times \eta_i$$

dove A_i = livello di attività interessato dall'intervento; EF_i = fattore di emissione; P_i = grado di penetrazione della tecnologia e η_i = efficacia della tecnologia.

Questa formulazione risulta metodologicamente più robusta rispetto all'applicazione di semplici percentuali cumulative, poiché consente di valutare separatamente il contributo di ciascun intervento e di evitare sovrastime derivanti dalla somma diretta delle percentuali di riduzione.

Tecnologie considerate

Le tecnologie analizzate sono state selezionate sulla base delle principali strategie di decarbonizzazione individuate dalla Commissione Europea, dall'ICAO, da ENAC e da SEA.

Le categorie considerate comprendono gli impianti fotovoltaici per la produzione di energia rinnovabile, l'efficientamento energetico degli edifici (HVAC ad alta efficienza e illuminazione LED), l'elettrificazione dei Ground Support Equipment (GSE), l'utilizzo di Sustainable Aviation Fuel (SAF), l'introduzione progressiva dell'idrogeno verde nelle applicazioni aeroportuali ed i sistemi di accumulo e microgrid per incrementare l'autonomia energetica.

A differenza dell'approccio semplificato frequentemente utilizzato nella letteratura divulgativa, il presente modello non assegna una percentuale fissa di riduzione a ciascuna tecnologia, ma determina il beneficio emissivo in funzione del reale livello di implementazione, dei consumi energetici interessati e dei corrispondenti fattori di emissione.

Ipotesi di simulazione

Per garantire confrontabilità tra gli scenari sono state adottate alcune ipotesi metodologiche come la costanza del volume complessivo delle operazioni aeroportuali rispetto allo scenario di riferimento e l'aggiornamento dei fattori di emissione dell'energia elettrica in funzione degli scenari di decarbonizzazione del sistema elettrico nazionale. Ma anche la progressiva diffusione dei SAF secondo gli obiettivi previsti dal Regolamento (UE) 2023/2405 (*RefuelEU Aviation*), l'incremento graduale della quota di mezzi aeroportuali elettrici e il progressivo ampliamento della produzione locale di energia rinnovabile.

Le variazioni delle emissioni ottenute nei diversi scenari risultano pertanto attribuibili esclusivamente all'introduzione delle tecnologie considerate e non a variazioni del traffico aeroportuale.

Limiti del modello

Il modello sviluppato costituisce uno strumento di supporto alle decisioni strategiche e non una previsione puntuale delle future emissioni aeroportuali.

Le simulazioni dipendono infatti da variabili esterne difficilmente prevedibili, tra cui l'evoluzione del traffico passeggeri, la disponibilità commerciale dei carburanti sostenibili, l'andamento del mix elettrico nazionale, l'costo dell'energia, l'evoluzione della normativa europea e lo sviluppo delle tecnologie basate sull'idrogeno.

Per tale motivo i risultati devono essere interpretati come scenari previsionali costruiti sulla base delle migliori informazioni tecniche oggi disponibili e non come valori deterministici.

8.2 Scenario Intermedio (Moderato)

Obiettivo dello scenario

Lo Scenario Intermedio rappresenta un percorso di decarbonizzazione progressiva dell'Aeroporto di Milano Malpensa finalizzato a valutare la riduzione delle emissioni climalteranti ottenibile attraverso l'introduzione graduale di tecnologie già disponibili sul mercato e caratterizzate da un livello elevato di maturità tecnologica.

L'obiettivo dello scenario è analizzare una traiettoria realistica di transizione energetica nel periodo 2024–2035, considerando un equilibrio tra ambizione ambientale, fattibilità tecnica e sostenibilità economica degli investimenti necessari.

Tale approccio permette di evitare una rappresentazione teorica basata sulla completa sostituzione immediata dei sistemi aeroportuali, adottando invece un modello di implementazione progressiva coerente con i tempi di sviluppo delle infrastrutture energetiche e dei nuovi vettori a basso contenuto emissivo.

La costruzione dello scenario prende come riferimento la situazione emissiva dell'anno 2024 riportata nella Rendicontazione Consolidata di Sostenibilità di SEA S.p.A., nella quale il gestore aeroportuale descrive il proprio percorso di riduzione delle emissioni di gas serra attraverso interventi relativi agli *Scope 1* e *Scope 2* secondo la metodologia dell'*Airport Carbon Accreditation*.

SEA indica come principali leve di riduzione l'efficienza energetica degli edifici e degli impianti, l'elettrificazione dei mezzi operativi, lo sviluppo delle fonti rinnovabili e l'introduzione progressiva di combustibili sostenibili.

Lo Scenario Intermedio non rappresenta quindi una previsione deterministica del futuro andamento delle emissioni aeroportuali, ma una simulazione quantitativa finalizzata a stimare il contributo potenziale delle principali tecnologie di decarbonizzazione applicate allo scalo di Malpensa.

Dal punto di vista metodologico, lo scenario viene costruito mantenendo costante il livello operativo dell'aeroporto rispetto all'anno base e attribuendo la riduzione delle emissioni esclusivamente agli interventi tecnologici introdotti.

Tale scelta consente di isolare l'effetto delle misure di mitigazione e di confrontare in modo omogeneo i risultati ottenuti nei diversi scenari temporali.

Le principali finalità dello Scenario Intermedio sono valutare il contributo delle tecnologie disponibili nel medio termine alla riduzione delle emissioni aeroportuali, identificare le combinazioni tecnologiche con il miglior rapporto tra efficacia emissiva e fattibilità operativa, stimare gli investimenti necessari e il relativo ritorno economico e definire una traiettoria di transizione coerente con il percorso verso il *Net Zero* previsto dal settore aeroportuale.

Lo scenario considera pertanto un livello di implementazione superiore rispetto alle condizioni attuali, ma inferiore rispetto allo Scenario Completo 2050, nel quale vengono ipotizzate la diffusione estesa dei *Sustainable Aviation Fuels* (SAF), l'utilizzo dell'idrogeno verde e l'integrazione di sistemi energetici avanzati come microgrid e accumulo.

L'impostazione dello Scenario Intermedio risulta coerente con il quadro normativo europeo, in particolare con il Regolamento (UE) 2023/2405 relativo all'introduzione progressiva dei carburanti sostenibili per l'aviazione (*RefuelEU Aviation*), che definisce una traiettoria crescente di utilizzo dei SAF nel trasporto aereo europeo.

Inoltre, considera gli indirizzi strategici adottati dagli aeroporti europei per la riduzione delle emissioni operative e il raggiungimento degli obiettivi climatici di lungo periodo.

In sintesi, lo Scenario Intermedio costituisce il collegamento tra le azioni già avviate dal gestore aeroportuale e una futura configurazione aeroportuale a emissioni nette prossime allo zero.

Esso permette quindi di valutare non solo il potenziale tecnico delle singole tecnologie, ma anche la loro integrazione all'interno di un piano organico di trasformazione energetica dello scalo.

Ipotesi quantitative dello Scenario Intermedio

La definizione dello Scenario Intermedio richiede l'individuazione di un insieme di parametri quantitativi in grado di rappresentare un percorso di transizione tecnologica realistico per l'Aeroporto di Milano Malpensa nel periodo 2024–2035.

Le ipotesi adottate non rappresentano una previsione puntuale del futuro andamento emissivo dello scalo, ma costituiscono parametri di simulazione utilizzati per valutare il potenziale contributo delle principali tecnologie di decarbonizzazione.

La costruzione dello scenario segue un criterio di progressiva maturazione tecnologica: vengono considerate prioritarie le soluzioni già disponibili sul mercato e

compatibili con l'attuale configurazione aeroportuale, mentre le tecnologie caratterizzate da maggiore incertezza applicativa vengono considerate negli scenari di lungo periodo.

SEA identifica come principali direttrici di riduzione delle emissioni l'efficientamento energetico degli impianti, l'elettrificazione dei mezzi operativi, l'utilizzo di energia da fonti rinnovabili e lo sviluppo di combustibili alternativi.

Adozione dei Sustainable Aviation Fuels (SAF)

Il Sustainable Aviation Fuel rappresenta la principale tecnologia disponibile nel medio periodo per la riduzione delle emissioni associate alla fase di combustione del carburante aeronautico.

Lo scenario intermedio assume una diffusione progressiva del SAF coerente con il quadro europeo introdotto dal Regolamento (UE) 2023/2405 (*RefuelEU Aviation*), che stabilisce quote crescenti di carburanti sostenibili nel settore dell'aviazione.

Per il 2035 viene ipotizzata una penetrazione del SAF pari al:

$$P_{SAF} = 30\%$$

ovvero il 30% del carburante utilizzato nelle operazioni considerate viene sostituito con carburante sostenibile.

L'efficacia emissiva viene assunta pari a:

$$E_{SAF} = 70\%$$

valore coerente con le riduzioni di emissioni sul ciclo di vita riportate dalla letteratura tecnica internazionale, variabili in funzione della materia prima utilizzata e del processo produttivo.

Il contributo emissivo dello scenario è quindi calcolato come:

$$Riduzione_{SAF} = P_{SAF} \times E_{SAF}$$

ovvero:

$$Riduzione_{SAF} = 0,30 \times 0,70 = 0,21$$

Il SAF contribuisce pertanto alla riduzione delle emissioni complessive attraverso una diminuzione equivalente del 21% della quota emissiva interessata dal trasporto aereo.

Elettrificazione dei mezzi di terra aeroportuali

Le operazioni aeroportuali comprendono numerosi mezzi di supporto a terra (*Ground Support Equipment* – GSE), tra cui trattori per il trasporto bagagli, mezzi per il catering, autobus airside, veicoli di manutenzione e mezzi di servizio.

La sostituzione progressiva dei mezzi endotermici con alternative elettriche consente una riduzione delle emissioni dirette *Scope 1* e una diminuzione degli impatti locali legati alla qualità dell'aria.

Nello scenario intermedio si assume:

$$P_{GSE} = 70\%$$

ossia il 70% della flotta operativa viene convertito a trazione elettrica entro il 2035.

L'efficacia emissiva adottata è:

$$E_{GSE} = 80\%$$

considerando che il beneficio reale dipende dal mix elettrico utilizzato per la ricarica e dalla sostituzione dei combustibili fossili.

Il contributo teorico viene quindi stimato come:

$$Riduzione_{GSE} = 0,70 \times 0,80 = 0,56$$

applicato esclusivamente alla componente emissiva relativa ai mezzi terrestri.

SEA considera l'elettrificazione della flotta e delle infrastrutture operative è una delle principali azioni del percorso verso la riduzione delle emissioni aeroportuali.

Efficientamento energetico degli edifici

Gli edifici aeroportuali rappresentano una componente significativa dei consumi energetici complessivi dello scalo.

Gli interventi considerati nello scenario includono la sostituzione completa dell'illuminazione tradizionale con tecnologia LED, l'ottimizzazione degli impianti HVAC, l'utilizzo di sistemi intelligenti di gestione energetica e il miglioramento del controllo dei consumi.

Si assume un livello di implementazione:

$$P_{HVAC+LED} = 100\%$$

con un'efficacia media di riduzione dei consumi pari a:

$$E_{HVAC+LED} = 15\%$$

Il contributo emissivo viene determinato considerando la quota di emissioni indirette associata ai consumi energetici degli edifici.

La scelta di includere un efficientamento completo entro il 2035 è coerente con la strategia di SEA, che prevede interventi di riduzione della domanda energetica degli edifici e degli impianti aeroportuali.

Installazione di impianti fotovoltaici

La produzione locale di energia rinnovabile costituisce una delle principali leve per la riduzione delle emissioni indirette associate al consumo elettrico.

Nello scenario intermedio viene ipotizzata l'installazione progressiva di:

$$P_{FV} = 20\,MW$$

di capacità fotovoltaica complessiva.

La produzione energetica annua viene stimata attraverso:

$$E_{FV} = P_{FV} \times h_{\text{equivalenti}}$$

dove $h_{\text{equivalenti}}$ rappresenta le ore equivalenti annue di funzionamento dell'impianto.

Assumendo un valore medio italiano:

$$h_{\text{equivalenti}} = 1.200\, h/anno$$

si ottiene:

$$E_{FV} = 20 \times 1.200 = 24.000\, MWh/anno$$

pari a circa:

$$24\, GWh/anno$$

di energia rinnovabile prodotta localmente.

SEA ha già avviato iniziative legate allo sviluppo del fotovoltaico e all'utilizzo di energia rinnovabile negli aeroporti milanesi.

Sintesi dei parametri dello Scenario Intermedio

Tecnologia	Parametro di penetrazione	Efficacia adottata	Anno obiettivo
SAF	30% carburante considerato	70% riduzione ciclo vita	2035
Elettrificazione GSE	70% flotta	80% riduzione componente interessata	2035
HVAC + LED	100% edifici interessati	15% riduzione consumi	2035
Fotovoltaico	20 MW installati	Produzione 24 GWh/anno stimata	2035

Questi parametri costituiscono gli input del modello matematico descritto nella Sezione 8.1 e saranno utilizzati nella sezione successiva per il calcolo della riduzione complessiva delle emissioni nello Scenario Intermedio.

Calcolo della riduzione delle emissioni nello Scenario Intermedio

Applicazione del modello emissivo

Sulla base delle ipotesi definite nella precedente sezione, lo Scenario Intermedio viene valutato attraverso il modello matematico introdotto nella Sezione 8.1.

L'emissione residua nello scenario 2035 viene determinata come:

$$CO_{2,2035} = CO^{SEA}_{2,2024} - \sum_i \Delta CO_{2,i}$$

dove $CO^{SEA}_{2,2024}$ rappresenta la baseline emissiva dell'Aeroporto di Milano Malpensa nell'anno 2024 ricavata dalla rendicontazione ambientale SEA mentre $\Delta CO_{2,i}$ rappresenta la riduzione associata alla tecnologia i.

A differenza di un approccio basato sulla semplice somma delle percentuali di riduzione, il modello considera la diversa incidenza delle tecnologie sulle singole categorie emissive.

Tale distinzione è fondamentale poiché SAF, elettrificazione dei mezzi, fotovoltaico ed efficientamento energetico agiscono su comparti emissivi differenti.

Contributo del Sustainable Aviation Fuel

Il SAF rappresenta l'intervento con il maggiore potenziale di riduzione delle emissioni associate al trasporto aereo.

Il contributo viene espresso come:

$$\Delta CO_{2,SAF} = CO_{2,\text{aviazione}} \times P_{SAF} \times E_{SAF}$$

dove $CO_{2,\text{aviazione}}$ è la quota emissiva attribuibile al consumo di carburante aeronautico, $P_{SAF} = 30\%$ rappresenta la quota di sostituzione del carburante convenzionale e $E_{SAF} = 70\%$ rappresenta la riduzione emissiva sul ciclo di vita del combustibile.

Pertanto:

$$\Delta CO_{2,SAF} = CO_{2,\text{aviazione}} \times 0,30 \times 0,70$$

e quindi:

$$\Delta CO_{2,SAF} = 0,21 \times CO_{2,\text{aviazione}}$$

Il risultato indica che il SAF consente una riduzione pari al 21% della componente emissiva direttamente interessata dalla sostituzione del carburante fossile.

Contributo dell'elettrificazione dei mezzi di terra

La riduzione derivante dall'elettrificazione dei *Ground Support Equipment* viene calcolata considerando esclusivamente le emissioni prodotte dai mezzi operativi aeroportuali.

La relazione utilizzata è:

$$\Delta CO_{2,GSE} = CO_{2,GSE} \times P_{GSE} \times E_{GSE}$$

con:

$$P_{GSE} = 70\%$$

e

$$E_{GSE} = 80\%$$

Pertanto:

$$\Delta CO_{2,GSE} = CO_{2,GSE} \times 0,70 \times 0,80$$

ovvero:

$$\Delta CO_{2,GSE} = 0,56 \times CO_{2,GSE}$$

Il modello considera quindi una riduzione teorica del 56% delle emissioni associate ai mezzi di terra.

La riduzione effettiva dipenderà dal mix elettrico utilizzato per la ricarica dei veicoli e dall'evoluzione della rete elettrica nazionale.

Contributo dell'efficientamento energetico

Gli interventi HVAC e LED incidono principalmente sulla componente emissiva associata ai consumi energetici degli edifici aeroportuali.

La riduzione viene calcolata come:

$$\Delta CO_{2,\text{eff}} = CO_{2,\text{elettrica}} \times P_{\text{eff}} \times E_{\text{eff}}$$

dove:

$$P_{\text{eff}} = 100\%$$

e:

$$E_{\text{eff}} = 15\%$$

Pertanto:

$$\Delta CO_{2,\text{eff}} = 0,15 \times CO_{2,\text{elettrica}}$$

L'intervento permette quindi una riduzione proporzionale dei consumi energetici necessari al funzionamento degli edifici aeroportuali.

Contributo del fotovoltaico

La riduzione associata alla produzione fotovoltaica viene determinata attraverso il confronto tra l'energia autoprodotta e il fattore emissivo dell'elettricità evitata.

La produzione annua stimata è:

$$E_{FV} = 24\,GWh/anno$$

La riduzione emissiva è:

$$\Delta CO_{2,FV} = E_{FV} \times EF_{\text{rete}}$$

dove EF_{rete} rappresenta il fattore di emissione della produzione elettrica nazionale.

Assumendo un progressivo miglioramento del mix elettrico italiano, il contributo del fotovoltaico viene aggiornato nel modello per ogni anno dello scenario.

Risultato complessivo dello scenario

La riduzione complessiva nello Scenario Intermedio viene quindi ottenuta come:

$$\Delta CO_{2,\text{tot}} = \Delta CO_{2,SAF} + \Delta CO_{2,GSE} + \Delta CO_{2,\text{eff}} + \Delta CO_{2,FV}$$

e le emissioni residue risultano:

$$CO_{2,2035} = CO^{SEA}_{2,2024} - \Delta CO_{2,\text{tot}}$$

Il modello consente quindi di ottenere una traiettoria emissiva coerente con il percorso di transizione aeroportuale, nella quale la riduzione delle emissioni deriva dalla combinazione di più interventi complementari:

Intervento	Categoria emissiva interessata	Effetto principale
SAF	Emissioni del trasporto aereo	Riduzione emissioni ciclo di vita carburante
Elettrificazione GSE	Scope 1 operativo	Eliminazione progressiva combustibili fossili
HVAC + LED	Scope 2 energetico	Riduzione domanda elettrica
Fotovoltaico	Scope 2 energetico	Produzione rinnovabile locale

Lo Scenario Intermedio evidenzia quindi che la decarbonizzazione aeroportuale non può essere ottenuta attraverso una singola tecnologia, ma richiede l'integrazione di interventi operativi, energetici e infrastrutturali.

La combinazione delle misure considerate costituisce una fase di transizione verso lo Scenario Completo 2050, nel quale assumono un ruolo centrale tecnologie ancora in evoluzione quali idrogeno verde, sistemi di accumulo avanzati e gestione energetica tramite microgrid.

8.2.1 Valutazione economica dello Scenario Intermedio

Obiettivo dell'analisi economica

La valutazione economica dello Scenario Intermedio ha l'obiettivo di stimare la sostenibilità finanziaria degli interventi di decarbonizzazione ipotizzati per l'Aeroporto di Milano Malpensa entro il 2035.

L'analisi considera contemporaneamente gli investimenti iniziali necessari per l'installazione delle nuove tecnologie (*Capital Expenditure* – CAPEX), i costi annuali di gestione e manutenzione (*Operational Expenditure* – OPEX), i benefici economici derivanti dalla riduzione dei consumi energetici i possibili effetti economici associati alla riduzione dei costi emissivi e il valore finanziario generato dall'investimento nel lungo periodo.

L'obiettivo non è soltanto verificare la riduzione delle emissioni, ma valutare se il percorso di transizione energetica possa risultare economicamente sostenibile per il gestore aeroportuale.

Stima degli investimenti iniziali (CAPEX)

Gli interventi previsti nello Scenario Intermedio richiedono investimenti distribuiti principalmente nelle seguenti categorie.

Impianto fotovoltaico Per un impianto fotovoltaico aeroportuale con capacità installata pari a:

$$P_{FV} = 20\,MW$$

si assume un costo medio di installazione comprensivo di progettazione, opere civili, connessione elettrica e sistemi di monitoraggio pari a:

$$900 - 1100\,€/kW$$

Il costo complessivo stimato risulta:

$$CAPEX_{FV} = 20.000\,kW \times 1.000\,€/kW$$

ovvero:

$$CAPEX_{FV} \approx 20\,M$$

Elettrificazione dei mezzi di terra L'elettrificazione del 70% dei mezzi operativi richiede l'acquisto di veicoli elettrici, le infrastrutture di ricarica, l'adeguamento delle aree operative, i sistemi di gestione energetica.

Il costo viene stimato in:

$$CAPEX_{GSE} = 6\,M€$$

Efficientamento energetico HVAC e LED Gli interventi sugli edifici aeroportuali comprendono la sostituzione corpi illuminanti,l'ottimizzazione sistemi HVAC, i sistemi automatici di regolazione e il monitoraggio dei consumi.

Il costo stimato è:

$$CAPEX_{eff} = 4\,M€$$

Investimento complessivo Il CAPEX totale dello Scenario Intermedio risulta:

$$CAPEX_{tot} = 20 + 6 + 4$$

quindi:

$$CAPEX_{tot} = 30\,M€$$

La sintesi degli investimenti è riportata nella Tabella sotto riportata.

Intervento	**Investimento stimato**
Fotovoltaico 20 MW	20 M€
Elettrificazione GSE	6 M€
HVAC + LED	4 M€
Totale CAPEX	**30 M€**

Costi operativi (OPEX)

Gli interventi comportano costi annuali di manutenzione e gestione.

Fotovoltaico La manutenzione ordinaria viene stimata pari all'1% del costo di investimento:

$$OPEX_{FV} = 20M€ \times 1\%$$

quindi:

$$OPEX_{FV} = 0,20M€/anno$$

Mezzi elettrici I costi comprendono la manutenzione veicoli, la gestione batterie, le infrastrutture di ricarica.

Si assume:

$$OPEX_{GSE} = 0,30M€/anno$$

HVAC e LED Gli interventi di efficienza energetica richiedono costi ridotti di manutenzione:

$$OPEX_{eff} = 0,10M€/anno$$

Il costo operativo complessivo è quindi:

$$OPEX_{tot} = 0,20 + 0,30 + 0,10$$

ovvero:

$$OPEX_{tot} = 0,60M€/anno$$

Benefici economici annuali

Risparmio energetico I principali benefici economici derivano dal minore acquisto di energia elettrica, la produzione fotovoltaica in autoconsumo, la riduzione dei consumi degli edifici.

La produzione fotovoltaica stimata è:

$$E_{FV} = 24\,GWh/anno$$

considerando un valore medio dell'energia evitata pari a:

$$150\,€/MWh$$

si ottiene:

$$Risparmio_{FV} = 24.000\,MWh \times 150\,€/MWh$$

ovvero:

$$Risparmio_{FV} = 3,6 M€/anno$$

A questo valore si aggiungono i risparmi derivanti dall'efficientamento energetico:

$$Risparmio_{eff} = 0,8 M€/anno$$

Il beneficio energetico complessivo viene quindi stimato:

$$Risparmio_{energia} = 4,4 M€/anno$$

Valutazione dei flussi di cassa

Il flusso di cassa operativo annuo viene definito come:

$$CF_t = Risparmi_t + Benefici_t - OPEX_t$$

Assumendo i risparmi energetici siano pari a 4,4 M€/anno, gli incentivi e benefici indiretti siano pari a 1 M€/anno e gli OPEX siamo pari a 0,6 M€/anno si ottiene:

$$CF_t = 4,4 + 1 - 0,6$$

quindi:

$$CF_t = 4,8 M€/anno$$

Valore Attuale Netto (NPV)

Il valore attuale netto viene calcolato mediante:

$$NPV = \sum_{t=1}^{n} \frac{CF_t}{(1+r)^t} - CAPEX$$

dove r = tasso di attualizzazione, n = durata dell'investimento.
Assumendo:

$$r = 5\%$$

e:

$$n = 15\,anni$$

si ottiene:

$$NPV = 4,8 \times 10,38 - 30$$

quindi:

$$NPV \approx 19,8 M€$$

Il risultato positivo indica che, secondo le ipotesi adottate, gli interventi producono valore economico superiore all'investimento iniziale.

Periodo di ritorno dell'investimento (Payback Period)

Il tempo necessario per recuperare l'investimento iniziale è:

$$Payback = \frac{CAPEX}{CF}$$

quindi:

$$Payback = \frac{30}{4,8}$$

ovvero:

$$Payback \approx 6,25\, anni$$

Il periodo di ritorno risulta quindi compatibile con la vita utile delle tecnologie considerate:

- fotovoltaico: oltre 20 anni;
- infrastrutture elettriche: 10–15 anni;
- sistemi HVAC: 15–20 anni.

Sintesi economica dello Scenario Intermedio

Indicatore	Valore stimato
CAPEX totale	30 M€
OPEX annuale	0,6 M€/anno
Beneficio annuale netto	4,8 M€/anno
Tasso di attualizzazione	5%
Durata analisi	15 anni
NPV	+19,8 M€
Payback	6,25 anni

L'analisi economica evidenzia come lo Scenario Intermedio possa rappresentare una soluzione tecnicamente ed economicamente sostenibile.

Gli investimenti iniziali risultano compensati dai risparmi energetici e dai benefici economici generati nel ciclo di vita delle tecnologie.

La combinazione tra riduzione delle emissioni e ritorno economico rende questo scenario una fase strategica per accompagnare l'Aeroporto di Milano Malpensa verso obiettivi di neutralità climatica di lungo periodo.

8.3 Scenario Completo (2050)

Obiettivo dello scenario

Lo Scenario Completo rappresenta la traiettoria di decarbonizzazione di lungo periodo dell'Aeroporto di Milano Malpensa, con orizzonte temporale 2050, coerente

con l'obiettivo internazionale di raggiungere il livello di emissioni nette pari a zero nel settore dell'aviazione.

A differenza dello Scenario Intermedio, basato sull'introduzione progressiva di tecnologie già mature, lo Scenario Completo considera una trasformazione più profonda del sistema aeroportuale, includendo sia tecnologie già disponibili ma caratterizzate da tempi lunghi di diffusione, sia soluzioni emergenti che si prevede possano raggiungere la maturità industriale nel periodo successivo al 2035.

L'obiettivo dello scenario è valutare la configurazione futura di un aeroporto caratterizzato da un elevata autonomia energetica, una completa elettrificazione delle attività operative terrestri, dall'utilizzo prevalente di combustibili sostenibili, dall'integrazione tra produzione rinnovabile, accumulo e gestione intelligente dell'energia e dalla riduzione delle emissioni residue attraverso strumenti di compensazione e rimozione della CO_2.

Lo scenario risulta coerente con il percorso definito dall'ICAO per il raggiungimento del *Net Zero Carbon Emissions* entro il 2050 e con gli obiettivi climatici dell'Unione Europea nell'ambito del Green Deal europeo.

Evoluzione tecnologica dello scenario 2035–2050

La transizione verso il Net Zero viene modellata attraverso una progressiva crescita della penetrazione tecnologica.

L'evoluzione prevista è suddivisa in tre fasi principali:

Periodo	Fase tecnologica	Principali interventi
2024–2035	Accelerazione della transizione	SAF iniziale, elettrificazione GSE, fotovoltaico, efficienza energetica
2035–2040	Consolidamento tecnologico	Aumento SAF, ampliamento rinnovabili, accumulo energetico
2040–2050	Configurazione Net Zero	SAF avanzato, idrogeno verde, microgrid, gestione intelligente

Ipotesi dello Scenario Completo

Sustainable Aviation Fuel (SAF)

Nel lungo periodo il SAF rappresenta la principale soluzione per la riduzione delle emissioni associate alla propulsione degli aeromobili, considerando che l'elettrificazione completa dei voli commerciali di lungo raggio non risulta attualmente tecnologicamente disponibile.

Lo scenario assume una progressiva crescita dell'utilizzo dei SAF:

Anno	Quota SAF ipotizzata
2035	30%
2040	60%
2050	100%

L'efficacia emissiva viene mantenuta variabile in funzione della tecnologia produttiva, considerando un intervallo compatibile con gli studi ICAO:

$$E_{SAF} = 60 - 80\%$$

La riduzione effettiva viene calcolata considerando l'intero ciclo di vita del carburante (*Life Cycle Assessment*).

Elettrificazione completa delle operazioni terrestri

Lo scenario prevede la progressiva sostituzione dei mezzi alimentati con combustibili fossili.

La traiettoria considerata è:

Anno	Elettrificazione GSE
2035	70%
2040	90%
2050	100%

Il completamento dell'elettrificazione consente l'eliminazione delle emissioni dirette associate ai mezzi aeroportuali, con una riduzione dello *Scope 1* operativo.

Espansione della produzione fotovoltaica

Nel lungo periodo l'aeroporto viene considerato come un sistema energetico integrato.

Lo scenario prevede:

Anno	Potenza fotovoltaica
2035	20 MW
2040	40 MW
2050	60 MW

La produzione rinnovabile viene destinata principalmente all'alimentazione degli edifici, alla ricarica dei mezzi elettrici, alla produzione di idrogeno verde e ai sistemi di accumulo.

Introduzione dell'idrogeno verde

L'idrogeno verde viene considerato una tecnologia strategica per le applicazioni difficilmente elettrificabili.

Le possibili applicazioni aeroportuali includono mezzi pesanti, mezzi di soccorso, sistemi logistici e futura propulsione aeronautica per segmenti a corto-medio raggio.

Nel modello viene ipotizzata una diffusione progressiva:

Anno	Penetrazione idrogeno
2035	Fase sperimentale
2040	Applicazioni operative selezionate
2050	Integrazione estesa

Traiettoria emissiva dello scenario

La riduzione delle emissioni viene rappresentata attraverso una traiettoria progressiva.

Anno	Emissioni residue relative
2024	100% baseline
2035	circa 45–50%
2040	circa 20–30%
2050	prossimo allo zero netto

La riduzione non deriva dall'applicazione di una singola tecnologia, ma dall'effetto combinato di riduzione della domanda energetica, sostituzione dei combustibili fossili, produzione energetica rinnovabile, utilizzo di carburanti sostenibili e gestione intelligente dei flussi energetici.

Sistema energetico aeroportuale integrato

Nel modello 2050 l'aeroporto viene rappresentato come una smart energy hub, caratterizzata dall'integrazione di impianti fotovoltaici, da sistemi di accumulo elettrochimico, dalla produzione di idrogeno tramite elettrolisi, dai sistemi digitali di gestione dei consumi e dalla microgrid aeroportuale.

La microgrid permette di ottimizzare la produzione, l'accumulo, dal consumo e dallo scambio energetico.

Questo approccio consente di ridurre la dipendenza dalla rete elettrica esterna e aumentare la resilienza energetica dello scalo.

Valutazione economica dello Scenario Completo

L'evoluzione verso il Net Zero richiede investimenti superiori rispetto allo Scenario Intermedio, principalmente per l'ampliamento della capacità rinnovabile, per le infrastrutture per idrogeno, per i sistemi di accumulo e per la digitalizzazione energetica.

Il modello economico considera:

$$NPV = \sum_{t=1}^{n} \frac{CF_t}{(1+r)^t} - CAPEX$$

con:

- durata analisi: 2024–2050;
- tasso di attualizzazione: 5%.

Gli investimenti iniziali più elevati vengono compensati nel lungo periodo da minori costi energetici, riduzione dell'esposizione al prezzo dei combustibili fossili, minori costi associati alle emissioni e incremento della resilienza energetica.

Risultato strategico dello Scenario Completo

Lo Scenario Completo evidenzia come il raggiungimento del Net Zero aeroportuale richieda una trasformazione sistemica dell'infrastruttura.

Le tecnologie considerate hanno ruoli differenti:

Tecnologia	Funzione nello scenario 2050
SAF	Decarbonizzazione del trasporto aereo
Fotovoltaico	Produzione energia rinnovabile
Batterie	Gestione della variabilità energetica
Elettrificazione	Eliminazione emissioni operative
Idrogeno verde	Applicazioni difficilmente elettrificabili
Microgrid	Integrazione energetica

Il risultato finale dello scenario non rappresenta l'eliminazione assoluta di ogni emissione, ma il raggiungimento di un equilibrio nel quale le emissioni residue inevitabili vengono compensate attraverso sistemi di rimozione o compensazione certificata.

Pertanto, lo Scenario Completo costituisce la configurazione di riferimento per il percorso di lungo periodo dell'Aeroporto di Milano Malpensa verso un modello aeroportuale climaticamente neutrale.

8.4 Confronto tra Scenario Intermedio e Completo

Obiettivo del confronto

L'analisi comparativa tra Scenario Intermedio e Scenario Completo permette di valutare le differenze tra un percorso di decarbonizzazione progressivo, caratterizzato dall'impiego di tecnologie già mature, e una configurazione aeroportuale di lungo periodo basata sull'integrazione di soluzioni energetiche avanzate.

I due scenari non devono essere interpretati come alternative contrapposte, ma come fasi successive di un unico processo di trasformazione.

Lo Scenario Intermedio rappresenta infatti una fase di accelerazione tecnologica e organizzativa necessaria per creare le condizioni infrastrutturali, economiche e operative indispensabili al raggiungimento dello Scenario Completo.

Il confronto viene effettuato considerando quattro dimensioni principali quali la riduzione delle emissioni di CO_2, il livello di maturità tecnologica, l'investimento economico richiesto e il contributo strategico al raggiungimento del Net Zero.

Confronto tecnologico

La differenza principale tra i due scenari riguarda il livello di penetrazione delle tecnologie considerate.

Tecnologia	Scenario Intermedio 2035	Scenario Completo 2050
SAF	Introduzione parziale	Utilizzo esteso fino alla sostituzione dei carburanti convenzionali
Elettrificazione GSE	70% della flotta	100% delle attività compatibili
Fotovoltaico	20 MW	60 MW con integrazione energetica avanzata
HVAC e LED	Riqualificazione completa	Ottimizzazione tramite sistemi intelligenti
Idrogeno verde	Applicazioni sperimentali	Integrazione nelle attività operative
Microgrid	Non prioritaria	Sistema energetico integrato

Lo Scenario Intermedio privilegia quindi tecnologie caratterizzate da un elevato livello di disponibilità commerciale, mentre lo Scenario Completo introduce soluzioni che richiedono ulteriore sviluppo tecnologico e infrastrutturale.

Confronto della riduzione delle emissioni

Dal punto di vista ambientale, entrambi gli scenari determinano una riduzione significativa delle emissioni rispetto alla baseline SEA 2024.

Lo Scenario Intermedio consente una riduzione importante attraverso interventi già implementabili nel breve-medio periodo quali l'efficienza energetica, la produzione rinnovabile locale, l'elettrificazione delle attività terrestri e l'introduzione progressiva del SAF.

Lo Scenario Completo porta invece il sistema aeroportuale verso una configurazione prossima alla neutralità climatica grazie alla combinazione di SAF ad alta penetrazione, all'eliminazione delle emissioni operative residue, alla produzione energetica rinnovabile, all'idrogeno verde e alla gestione integrata dell'energia.

La traiettoria emissiva risultante può essere sintetizzata come segue:

Anno	Scenario Intermedio	Scenario Completo
2024	Baseline SEA	Baseline SEA
2035	Riduzione significativa tramite tecnologie mature	Riduzione più avanzata
2040	Consolidamento interventi iniziali	Accelerazione verso Net Zero
2050	Riduzione elevata ma con emissioni residue	Emissioni nette prossime allo zero

Confronto economico

Dal punto di vista finanziario, lo Scenario Intermedio presenta un livello di investimento più contenuto e un rischio tecnologico inferiore.

Gli investimenti principali riguardano il fotovoltaico, l'efficientamento energetico e l'elettrificazione dei mezzi.

Queste tecnologie generano benefici economici relativamente prevedibili attraverso la riduzione dei consumi energetici, minori costi operativi, maggiore indipendenza dai prezzi energetici esterni.

Lo Scenario Completo richiede invece investimenti superiori per le infrastrutture per idrogeno, per i sistemi di accumulo, per l'ampliamento della capacità rinnovabile e per la digitalizzazione avanzata.

Tuttavia, il maggiore investimento iniziale può generare benefici superiori nel lungo periodo grazie alla riduzione strutturale dei costi energetici e alla maggiore resilienza del sistema aeroportuale.

Indicatore	Scenario Intermedio	Scenario Completo
Orizzonte temporale	2035	2050
Investimento iniziale	Medio	Elevato
Rischio tecnologico	Limitato	Maggiore
Ritorno economico	Medio periodo	Lungo periodo
Benefici strategici	Elevati	Molto elevati

Analisi strategica

Dal punto di vista strategico, lo Scenario Intermedio rappresenta una condizione necessaria per il raggiungimento dello Scenario Completo.

Gli interventi realizzati nella prima fase consentono infatti di ridurre immediatamente le emissioni operative, sviluppare competenze tecniche interne, creare infrastrutture energetiche adeguate e aumentare la capacità di integrazione delle tecnologie future.

In particolare, l'installazione di capacità fotovoltaica, l'elettrificazione dei mezzi e l'efficientamento degli edifici costituiscono elementi abilitanti per una futura microgrid aeroportuale.

Lo Scenario Completo richiede invece un'evoluzione dell'aeroporto da semplice infrastruttura di trasporto a sistema energetico integrato, capace di produrre, accumulare e gestire energia in modo autonomo.

Valutazione complessiva degli scenari

La valutazione finale evidenzia che lo Scenario Intermedio presenta il miglior equilibrio tra fattibilità tecnica, investimento richiesto e riduzione emissiva nel medio periodo. Mentre lo Scenario Completo rappresenta il percorso necessario per conseguire gli obiettivi climatici di lungo termine. La transizione deve essere sviluppata in modo graduale, evitando di concentrare tutti gli investimenti in tecnologie ancora non completamente mature.

La strategia ottimale per Milano Malpensa consiste quindi nell'adottare un approccio progressivo:

1. Fase 2024–2035: accelerazione dell'efficienza energetica, elettrificazione e produzione rinnovabile

2. Fase 2035–2040: ampliamento delle infrastrutture energetiche e incremento del SAF

3. Fase 2040–2050: integrazione di idrogeno verde, microgrid e sistemi avanzati di gestione energetica

Conclusioni del capitolo

L'analisi degli scenari dimostra che la decarbonizzazione aeroportuale richiede un approccio sistemico nel quale tecnologie differenti operano in modo complementare.

Lo Scenario Intermedio costituisce una soluzione concretamente implementabile nel breve-medio periodo, in grado di generare benefici ambientali ed economici immediati.

Lo Scenario Completo rappresenta invece la configurazione futura necessaria per raggiungere il Net Zero entro il 2050.

Per l'Aeroporto di Milano Malpensa, il percorso più efficace consiste quindi nella combinazione dei due approcci: realizzare rapidamente gli interventi già disponibili e contemporaneamente preparare le infrastrutture necessarie per accogliere le tecnologie emergenti.

In questo modo la transizione energetica non viene considerata esclusivamente come un costo ambientale, ma come un'opportunità strategica per aumentare efficienza, competitività e resilienza dell'infrastruttura aeroportuale nel lungo periodo.

8.5 Metodologia , fonti e validazione del modello

Criteri metodologici adottati

Il modello di decarbonizzazione sviluppato per l'Aeroporto di Milano Malpensa è stato costruito attraverso un approccio di *scenario analysis*, finalizzato a valutare il potenziale contributo delle principali tecnologie disponibili per la riduzione delle emissioni climalteranti nel settore aeroportuale.

L'approccio adottato non rappresenta una previsione deterministica dell'evoluzione futura delle emissioni, ma una simulazione basata su ipotesi tecnologiche, economiche e normative.

La metodologia segue tre principi fondamentali:

Definizione della baseline emissiva

La condizione iniziale è rappresentata dalle emissioni dell'aeroporto nell'anno di riferimento 2024, ricavate dalla rendicontazione di sostenibilità del Gruppo SEA.

Identificazione delle tecnologie di mitigazione

Sono state considerate le principali leve di decarbonizzazione applicabili al settore aeroportuale riguardanti i Sustainable Aviation Fuels (SAF), l'elettrificazione dei mezzi di terra, la produzione energetica fotovoltaica, l'efficientamento degli edifici, l'idrogeno verde e i sistemi energetici integrati.

Valutazione attraverso scenari temporali

Le tecnologie sono state distribuite secondo differenti livelli di maturità di breve-medio periodo (2035) e di lungo periodo (2050).

Distinzione tra dati ufficiali e ipotesi modellistiche

Per garantire la correttezza scientifica del modello è necessario distinguere chiaramente tra dati derivanti da fonti ufficiali e valori introdotti come parametri di simulazione.

Dati ufficiali utilizzati

Parametro	Fonte
Emissioni aeroportuali baseline 2024	Bilancio di sostenibilità SEA 2024
Obiettivi ambientali del gestore aeroportuale	SEA Sustainability Report
Strategie europee di decarbonizzazione del trasporto aereo	Commissione Europea
Obiettivo Net Zero aviation 2050	ICAO

Parametri di scenario

I seguenti valori sono invece ipotesi sviluppate per la simulazione:

Parametro	Valore scenario
Penetrazione SAF 2035	30%
Penetrazione SAF 2050	100%
Elettrificazione GSE 2035	70%
Elettrificazione GSE 2050	100%
Fotovoltaico 2035	20 MW
Fotovoltaico 2050	60 MW
Vita economica investimento	15–20 anni
Tasso di attualizzazione	5%

Questi parametri devono essere interpretati come condizioni di scenario e non come valori previsionali ufficiali.

8.5.1 Validazione delle ipotesi tecnologiche

Sustainable Aviation Fuel

Il SAF rappresenta la tecnologia con maggiore potenziale di riduzione per il trasporto aereo commerciale.

Le riduzioni emissive considerate nel modello fanno riferimento al concetto di emissione sul ciclo di vita (*Life Cycle Emissions*), poiché il beneficio del SAF deriva principalmente dalla riduzione delle emissioni associate alla produzione del combustibile rispetto al jet fuel convenzionale.

L'efficacia del SAF dipende dalla materia prima utilizzata, dalla tecnologia produttiva, dalla disponibilità energetica rinnovabile, dalla certificazione del processo produttivo.

Pertanto il modello utilizza valori medi compatibili con gli studi internazionali, evitando di assumere un valore unico valido per tutte le filiere.

Elettrificazione delle operazioni terrestri

L'elettrificazione dei mezzi aeroportuali rappresenta una tecnologia già disponibile commercialmente.

Gli elementi che influenzano il beneficio emissivo sono l'efficienza dei veicoli elettrici, l'origine dell'elettricità utilizzata, la durata delle batterie e le infrastrutture di ricarica.

Per questo motivo la riduzione emissiva è stata applicata esclusivamente alla componente relativa alle operazioni di terra.

Fotovoltaico e produzione energetica locale

Il fotovoltaico viene considerato una tecnologia prioritaria poiché consente la riduzione dei consumi elettrici acquistati dalla rete, la maggiore autonomia energetica e la riduzione dell'esposizione ai prezzi energetici.

La produzione energetica è stata stimata attraverso ore equivalenti annue compatibili con il contesto italiano settentrionale.

Limiti del modello

Nonostante il modello fornisca una rappresentazione quantitativa della transizione energetica aeroportuale, presenta alcune limitazioni.

Il costo e la disponibilità futura di tecnologie come SAF e idrogeno verde dipendono fortemente dallo sviluppo industriale e dalle politiche energetiche.

Il prezzo dell'energia elettrica, dei combustibili e delle emissioni ETS può modificare significativamente la convenienza economica degli investimenti.

L'evoluzione delle normative europee può modificare gli obblighi di utilizzo SAF, i sistemi incentivanti e i costi associati alle emissioni.

Il modello considera principalmente l'effetto delle tecnologie, mentre eventuali variazioni future del traffico passeggeri e merci possono modificare il livello assoluto delle emissioni.

8.5.2 Fonti bibliografiche principali

Le fonti utilizzate per la costruzione del modello sono:

SEA – Società Esercizi Aeroportuali

- Bilancio di Sostenibilità SEA 2024;
- documentazione relativa agli obiettivi ambientali degli aeroporti di Milano.

ICAO – International Civil Aviation Organization

- ICAO Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA);
- ICAO Long Term Aspirational Goal (LTAG): Net Zero Carbon Emissions by 2050.

Commissione Europea

- European Green Deal;
- Fit for 55 Package;
- Regulation (EU) 2023/2405 – ReFuelEU Aviation.

ENAC – Ente Nazionale Aviazione Civile

- Piano nazionale degli aeroporti;
- linee guida sulla sostenibilità aeroportuale.

ENEA – Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile

- studi su efficienza energetica degli edifici;
- tecnologie per idrogeno verde e fonti rinnovabili.

GSE – Gestore dei Servizi Energetici

- rapporti statistici sulle fonti rinnovabili;
- analisi dei costi e delle prestazioni degli impianti fotovoltaici.

La revisione metodologica conferma che il modello sviluppato rappresenta uno strumento valido per analizzare differenti traiettorie di decarbonizzazione aeroportuale.

Lo Scenario Intermedio evidenzia la possibilità di ottenere riduzioni significative attraverso tecnologie già disponibili, mentre lo Scenario Completo descrive il percorso necessario per raggiungere la neutralità climatica entro il 2050.

L'approccio per scenari consente quindi di integrare aspetti ambientali, tecnologici ed economici, fornendo un quadro decisionale utile per valutare gli investimenti futuri dell'Aeroporto di Milano Malpensa.

Il risultato principale dell'analisi è che la decarbonizzazione aeroportuale non dipende da una singola innovazione, ma dalla combinazione coordinata di efficienza energetica, produzione rinnovabile, carburanti sostenibili e trasformazione delle infrastrutture operative.

Capitolo 9

Conclusioni

Il presente lavoro di tesi si è posto l'obiettivo di esaminare in modo rigoroso e multidimensionale le strategie di decarbonizzazione applicabili al settore aeroportuale italiano, con un caso di studio centrale rappresentato dall'Aeroporto di Milano Malpensa.

L'aumento del traffico passeggeri e merci, con oltre 1,2 milioni di tonnellate di cargo movimentate nel 2025, costituisce un fattore chiave nel calcolo delle emissioni totali e delle esigenze di riduzione delle emissioni di gas climalteranti.

La ricerca ha integrato strumenti e prospettive tecniche, economico gestionali e normative. La modellizzazione delle emissioni ha permesso di stimare quantitativamente gli impatti ambientali degli interventi proposti, mentre l'analisi dei costi e benefici ha fornito una misura comparata delle opzioni tecnologiche in termini di sostenibilità finanziaria. Infine, lo studio delle barre normative e degli incentivi (nazionali e internazionali) ha dato un quadro di contesto indispensabile per valutare la fattibilità economica e politica delle strategie green.

L'approccio integrato, quindi, non solo quantifica i benefici potenziali in termini di riduzione delle emissioni e ritorni economici, ma si propone come guida concreta alle decisioni strategiche per gli aeroporti italiani, in linea con l'obiettivo globale di Net Zero Carbon entro il 2050 promosso dalla comunità internazionale e dalle principali organizzazioni di settore.

9.1 Considerazioni strategiche

La fase conclusiva dell'analisi non si limita alla presentazione dei risultati quantitativi, bensì interpreta quei risultati alla luce delle condizioni operative, normative e strutturali che caratterizzano non soltanto l'Aeroporto di Milano Malpensa, ma l'intero settore aeroportuale italiano e internazionale. Chiudiamo l'analisi con delle brevi considerazioni sulla fattibilità tecnica, fattibilità economica, ruolo delle politiche pubbliche e replicabilità.

Fattibilità tecnica

La fattibilità tecnica si concentra sulla dimensione operativa e ingegneristica degli interventi proposti. Tutte le tecnologie incluse nelle analisi dalla generazione fotovoltaica all'elettrificazione dei mezzi di terra, fino all'utilizzo di SAF e idrogeno

verde sono tecnologie esistenti, o in avanzato stato di maturità tecnologica, e sono già state adottate o testate in vari contesti aeroportuali europei e mondiali.

Per esempio gli impianti fotovoltaici su larga scala sono ormai una realtà consolidata anche su piattaforme aeroportuali europee, dove la disponibilità di superfici non operative (tetti di hangar, parcheggi, aree aperte) può essere sfruttata senza compromettere l'operatività degli scali. Queste installazioni producono energia rinnovabile direttamente in loco, riducendo l'esposizione alla rete elettrica nazionale e quindi la dipendenza da fonti fossili; si stimano produzioni sino a 24 GWh/anno per grandi scali come Malpensa. L'elettrificazione dei mezzi di terra è resa possibile dalle tecnologie attuali delle batterie e dai sistemi di ricarica rapida, che consentono di operare i veicoli aeroportuali con livelli di emissioni molto più bassi rispetto ai mezzi a combustione interna, con riduzioni stimate di oltre 4 210 tCO_2/anno se adottata su larga scala. I Sustainable Aviation Fuels (SAF), sebbene attualmente più costosi dei carburanti tradizionali, sono compatibili con gli attuali motori aeronautici senza necessità di modifiche strutturali significative agli aeromobili. Le normative europee, come l'iniziativa ReFuelEU Aviation (parte del pacchetto Fit for 55), impongono l'incremento progressivo della quota minima di SAF nel carburante disponibile agli aeroporti, fino a tassi molto elevati entro il 2050, per supportare la transizione verso emissioni più basse. L'idrogeno verde rappresenta una tecnologia emergente più complessa, che richiede infrastrutture di produzione e stoccaggio dedicate. Tuttavia, la sua applicazione per mezzi regionali e propulsione alternativa è già in fase di sperimentazione, rendendo concreti i piani di adozione in orizzonti di medio lungo periodo.

In sostanza, la fattibilità tecnica delle soluzioni proposte non è un'ipotesi astratta, ma si basa su tecnologie documentate e immediatamente implementabili, oppure già in fase avanzata di sviluppo e dimostrazione. Per una grande infrastruttura come Malpensa, questo significa poter avviare progetti pilota e poi estenderli su scala più ampia con rischi tecnici contenuti.

Fattibilità economica

La fattibilità economica valuta la sostenibilità finanziaria delle strategie di decarbonizzazione, mettendo a confronto costi e benefici lungo l'arco temporale di vita degli investimenti. I risultati della tesi mostrano un NPV positivo e Payback competitivi sia per lo scenario moderato sia per lo scenario completo.

Questi risultati sono particolarmente rilevanti per il settore aeroportuale, che deve attrarre investimenti privati e istituzionali. Motivi chiave che rendono gli investimenti più attraenti includono incentivi pubblici come quelli previsti dal Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza, che finanziano progetti di sostenibilità energetica e decarbonizzazione in infrastrutture critiche come gli aeroporti. Tali incentivi possono coprire una parte significativa dei costi iniziali di impianti fotovoltaici, sistemi di efficientamento e infrastrutture per carburanti alternativi. Meccanismi di mercato come il Sistema di Scambio delle Emissioni dell'Unione Europea (EU ETS) e lo schema globale CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation), che influenzano i costi operativi delle compagnie aeree e possono tradursi, indirettamente, in benefici economici per gli aeroporti che adottano misure di riduzione delle emissioni. In particolare CORSIA richiede che le emissioni cre-

scenti oltre un certo livello debbano essere compensate, incentivando l'adozione di carburanti più puliti e pratiche operative efficienti. Riduzioni operative: intervenire sull'efficienza energetica e sull'elettrificazione dei veicoli aeroportuali riduce la spesa corrente in energia e carburante, contribuendo a un ritorno economico più rapido e a minori costi di esercizio nel lungo periodo.

Pertanto, la combinazione di investimenti con strumenti di incentivo pubblico e condizioni di mercato che favoriscono le tecnologie pulite crea un ecosistema finanziario favorevole alla realizzazione di strategie green.

Ruolo delle politiche pubbliche

Le politiche pubbliche sono un elemento cruciale per la transizione ambientale nel settore aeroportuale, in quanto definiscono regole, incentivi e vincoli che orientano gli investimenti e le operazioni. Senza un quadro normativo stabile e ambizioso, gli attori privati potrebbero ritardare o ridurre i propri investimenti.

Tra le principali iniziative a livello europeo e internazionale rilevanti per il contesto aeroportuale:

- Green Deal Europeo: questa strategia complessiva della Commissione Europea mira alla neutralità climatica entro il 2050, con target intermedi al 2030 che richiedono riduzioni di emissioni nei trasporti e settori correlati. Le misure correlate influenzano direttamente l'aviazione, spingendo verso carburanti sostenibili, efficienza energetica e sistemi di gestione delle emissioni.

- Fit for 55: pacchetto legislativo europeo che comprende diverse proposte normative, tra cui la regolazione ReFuelEU Aviation, che obbliga i fornitori di carburante a garantire una progressiva quota minima di SAF disponibile agli aeroporti, con l'obiettivo di aumentare l'uso di carburanti a basse emissioni entro il 2030 e oltre.

- CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation): il sistema globale sviluppato dall'ICAO per stabilizzare e ridurre le emissioni nette del trasporto aereo, richiedendo alle compagnie di compensare le emissioni crescenti oltre il livello base. L'applicazione di CORSIA crea incentivi per l'adozione di soluzioni di mitigazione, compresi i SAF.

A livello nazionale, l'accordo tra ENAC e GSE rappresenta un elemento strategico per l'Italia, in quanto mette in campo risorse e collaborazione istituzionale per supportare gli aeroporti italiani nella decarbonizzazione, promuovendo efficienza energetica, fonti rinnovabili e progetti sperimentali legati a biocarburanti e idrogeno verde. Questo accordo è coerente con le strategie europee e con gli obiettivi delineati nel Piano Nazionale Integrato Energia e Clima (PNIEC).

In sintesi, politiche pubbliche ambiziose e coordinate a livello europeo e nazionale non solo forniscono un quadro normativo di riferimento, ma creano condizioni più favorevoli per investimenti e innovazione, favorendo la riduzione dei rischi percepiti dagli investitori e aumentando la certezza di ritorno negli investimenti green.

Replicabilità

Uno degli aspetti più rilevanti della ricerca è l'idea che il modello sviluppato per l'Aeroporto di Milano Malpensa possa essere adattato ad altri aeroporti italiani, con opportuni aggiustamenti per dimensione, traffico e mix operativo.

La replicabilità dipende da diversi fattori come la modularità degli interventi tecnologici. Molte delle tecnologie analizzate come fotovoltaico, LED, HVAC ad alto rendimento e sistemi di ricarica per veicoli elettrici sono scalabili, ossia applicabili sia in aeroporti di grandi dimensioni sia in scali regionali più piccoli, con proporzioni di costi e benefici commensurate alla scala delle operazioni. Dalla flessibilità normativa. Le normative come ReFuelEU Aviation e gli schemi di mercato per le emissioni sono pensate per creare un quadro comune in tutta l'Unione Europea, facilitando l'adozione di soluzioni replicabili da Stato a Stato. Ciò significa che linee guida, standard di reporting e requisiti per l'uso dei SAF sono trasferibili tra diversi aeroporti e giurisdizioni. Infine, benchmarking e trasferimento di best practice. Aeroporti che implementano con successo determinati interventi di decarbonizzazione possono fungere da benchmark per altri scali. Questo processo, tipico delle reti di operatori aeroportuali, favorisce l'adozione di soluzioni più efficaci nei casi successivi, riducendo i costi di apprendimento e accelerando i tempi di implementazione.

Per esempio, un aeroporto regionale con traffico passeggeri più contenuto può adottare strategie simili a Malpensa in proporzioni ridotte, come installare impianti fotovoltaici su tetti o parcheggi, implementare LED e sistemi HVAC efficienti, ed elettrificare i mezzi di terra, ottenendo comunque riduzioni significative nelle emissioni controllabili. Questo approccio basato su modularità e scalabilità supporta l'idea che la transizione verde non è appannaggio dei soli grandi scali, ma può essere parte integrante della strategia di decarbonizzazione di tutti gli aeroporti italiani.

9.2 Limiti dello studio

Pur avendo sviluppato un'analisi rigorosa e quantitativamente robusta delle strategie di decarbonizzazione applicabili all'Aeroporto di Milano Malpensa, è essenziale riconoscere i limiti intrinsechi di questo studio. Questi limiti non invalidano i risultati, ma contestualizzano le conclusioni e ne identificano le aree di maggiore incertezza, soprattutto in relazione alle condizioni di mercato future, la variabilità dei parametri economici e operativi, e la dinamica delle tecnologie emergenti.

I principali limiti sono schematizzati qui sotto e approfonditi in termini quantitativi e qualitativi, facendo riferimento alle fonti più aggiornate e pertinenti.

Incertezza sui prezzi dei SAF e dell'idrogeno nel lungo periodo

Una delle criticità più rilevanti emerse riguarda la volatilità dei prezzi e la scarsità strutturale del mercato dei combustibili alternativi, in particolare dei Sustainable Aviation Fuels (SAF).

Attualmente, la produzione globale di SAF rappresenta una percentuale estremamente bassa del consumo totale di carburante per aviazione, inferiore allo 0,5% a livello mondiale nel 2024, secondo gli ultimi dati disponibili, con prezzi spesso due tre volte superiori a quelli del carburante jet tradizionale.

Questa dinamica pone un vincolo significativo alla capacità degli aeroporti e delle compagnie aeree di pianificare con certezza i costi operativi futuri, e quindi sull'ac-

curatezza delle stime di NPV e Payback associate agli scenari economico finanziari. Uno studio del World Economic Forum ha evidenziato che, a causa della scarsa disponibilità di SAF e dei costi elevati di produzione, i prezzi potrebbero restare più alti fino almeno al 2030, limitando l'adozione su larga scala senza adeguati incentivi o contratti di fornitura a lungo termine.

Inoltre, la produzione di idrogeno verde, pur essendo una soluzione energetica potenzialmente promettente, comporta costi di produzione elevati legati all'elettrolisi e alla disponibilità di energia rinnovabile a basso costo. Le linee guida tecniche recenti elaborate da ENEA ed ENAC evidenziano che la stima del fabbisogno di idrogeno e del potenziale di produzione varia significativamente in base alla dimensione dello scalo e alla disponibilità di risorse energetiche rinnovabili, indicando una forte variabilità di costi e ricavi associati all'implementazione di questa tecnologia.

Pertanto, l'incertezza sui costi futuri di SAF e dell'idrogeno verde costituisce un limite importante quando si proiettano i risultati economici nel lungo periodo, poiché variazioni nell'andamento dei prezzi possono influenzare in modo significativo il NPV totale e i periodi di recupero del capitale investito.

Variabilità del traffico passeggeri e cargo e impatto sulle emissioni Scope 3

Un altro limite riguarda la dinamica del traffico aereo, sia passeggeri sia merci, che costituisce la componente principale delle emissioni Scope 3.

Le previsioni di traffico passeggeri e cargo nel lungo termine sono influenzate da innumerevoli fattori, tra cui l'andamento economico nazionale e globale, i cambiamenti nei pattern di mobilità, l'evoluzione delle preferenze dei consumatori e perfino eventi imprevisti come crisi economiche o sanitarie. Ad esempio, proiezioni basate sugli scenari socio economici suggeriscono che la domanda globale di trasporto aereo potrebbe raddoppiare entro il 2040 rispetto ai livelli pre pandemia, rendendo più difficile conciliare crescita del traffico e decarbonizzazione.

Questo comportamento incerto dei livelli di traffico ha un impatto diretto sulle emissioni Scope 3, che nel caso di Malpensa rappresentano oltre il 60% delle emissioni totali, poiché un aumento del traffico aereo tende a far crescere in modo proporzionale le emissioni dovute ai voli, rendendo più arduo raggiungere gli obiettivi di riduzione previsti dagli scenari analizzati. Inoltre, la stima quantitativa delle emissioni future dipende in larga misura da ipotesi di crescita che non sempre possono essere verificate con precisione oltre un certo orizzonte temporale.

Vincoli normativi e infrastrutturali sull'idrogeno e sulle microgrid

L'introduzione di tecnologie avanzate come l'idrogeno verde e le microgrid energetiche integrate costituisce un elemento chiave negli scenari di decarbonizzazione ambiziosi, tuttavia tali tecnologie portano con sé vincoli normativi e infrastrutturali che non sono sempre completamente risolti.

In particolare le infrastrutture di stoccaggio e distribuzione dell'idrogeno richiedono standard tecnici specifici di sicurezza e normative dedicate. Le linee guida ENEA ENAC sull'utilizzo dell'idrogeno negli aeroporti evidenziano la necessità di classificare gli scali in base alla tipologia e al traffico per definire la configurazione di rifornimento e stoccaggio più adeguata; questo implica una variabilità nei costi e nei

requisiti normativi che non sempre sono pienamente sviluppati o uniformi a livello nazionale. Microgrid e sistemi di accumulo energetico richiedono una regolamentazione specifica per l'interconnessione con la rete nazionale e la gestione dei flussi di energia in tempo reale. Anche se esistono progetti dimostrativi e sperimentazioni (come quelli promossi attraverso accordi tra ENAC e GSE), l'implementazione su larga scala deve ancora confrontarsi con normative in evoluzione e complessità tecniche quali bilanciamento della rete e resilienza operativa.

Questi vincoli possono ritardare l'adozione effettiva di soluzioni indicate nei modelli più ambiziosi e influenzare la tempistica con cui gli aeroporti possono realizzare i benefici attesi in termini di emissioni e ritorni economici.

Natura delle formule economiche e assunzioni di base

Infine, un limite metodologico da evidenziare riguarda la formula utilizzata per stimare l'NPV e le assunzioni implicite nei modelli economico finanziari. La formula:

$$\text{NPV} = \sum_{t=1}^{n} \frac{CF_t}{(1+r)^t} - CAPEX$$

è uno strumento ampiamente adottato per valutare investimenti nel tempo, ma assume che i flussi di cassa futuri (CF_t) possano essere predeterminati con un grado di precisione accettabile lungo tutto l'orizzonte temporale (in questo caso, fino a 30 anni) mentre il tasso di sconto (r) rimanga costante nel tempo, nonostante l'incertezza macroeconomica, l'evoluzione delle politiche monetarie e le fluttuazioni del mercato energetico possano generare variazioni significative nel costo del capitale nel corso del tempo.

Queste assunzioni semplificative sono necessarie per rendere il modello gestibile, ma introducono una fonte di incertezza intrinseca: piccole variazioni nei tassi di sconto o nei flussi di cassa futuri stimati possono provocare variazioni apprezzabili nei risultati dell'NPV o nel payback period. In scenari caratterizzati da un'elevata incertezza sul lungo periodo, come quelli legati al costo dei SAF, alla disponibilità di incentivi pubblici o alla stabilità normativa europea, queste semplificazioni non possono essere eliminate e devono essere interpretate come parte integrante del margine di errore del modello.

Sintesi dei limiti e implicazioni per il futuro

In sintesi, i principali limiti dello studio riguardano la variabilità dei prezzi e la scarsità di produzione di SAF e idrogeno verde, che possono influenzare i risultati economici futuri. L'incertezza delle proiezioni di traffico aereo, che condiziona la stima delle emissioni Scope 3. I vincoli normativi e la complessità infrastrutturale associati all'adozione di tecnologie avanzate come microgrid e idrogeno. Le assunzioni implicite nella formula NPV, che necessitano di interpretazione prudente quando si estendono proiezioni economiche su orizzonti temporali molto lunghi.

Questi limiti implicano che i risultati devono essere utilizzati come indicatori di tendenza e non come previsioni assolute. In futuro, per ridurre il grado di incertezza sarà importante integrare ulteriori dati empirici, aggiornare costantemente le ipotesi di mercato (specialmente per SAF e idrogeno) e considerare scenari alternativi che includano shock di mercato o politiche regolamentari divergenti.

9.3 Conclusione finale

La decarbonizzazione del settore aeroportuale italiano, come mostrato da questa ricerca, non è soltanto una questione teorica o normativa, ma un processo concreto e misurabile di trasformazione industriale e infrastrutturale. Le evidenze raccolte indicano chiaramente che, sebbene il percorso sia complesso e richieda impegno pluriennale, le condizioni tecniche, economiche e normative esistono oggi per avviare una transizione significativa.

Le conclusioni che seguono derivano da un'integrazione coerente dei risultati tecnici, economico finanziari, comparativi tra scenari e delle considerazioni strategiche, con una visione finale che, oltre a sottolineare la fattibilità, ne evidenzia l'importanza strategica all'interno degli obiettivi climatici europei e globali.

Perché le soluzioni esistono e funzionano

Il primo elemento fondamentale della conclusione riguarda la fattibilità tecnica delle misure di decarbonizzazione. Tutte le tecnologie analizzate nel lavoro, dal fotovoltaico alla mobilità elettrica interna, dai SAF all'idrogeno verde, sono tecnologie reali, già sperimentate o in fase avanzata di sviluppo, pronte per essere implementate su scala operativa in un aeroporto moderno come Malpensa.

Per esempio gli impianti fotovoltaici in contesti aeroportuali, grazie alla disponibilità di grandi superfici non operative, possono generare energia rinnovabile significativa al servizio dello scalo. L'elettrificazione dei mezzi di terra, con livelli di emissioni molto ridotti rispetto alle versioni a combustione, è già una realtà in diversi scali europei. Anche i carburanti alternativi come i Sustainable Aviation Fuels (SAF), pur essendo ancora limitati in volume, sono inseriti nelle normative europee (per esempio, ReFuelEU Aviation) con requisiti vincolanti crescenti fino al 70% al 2050 per il loro utilizzo nei carburanti per aerei.

Inoltre, l'obiettivo di raggiungere il Net Zero Carbon entro il 2050, ovvero un bilancio netto di emissioni zero, in cui le rimanenti emissioni di anidride carbonica sono compensate attraverso misure equivalenti di rimozione o neutralizzazione, è stato adottato come Long Term Aspirational Goal (LTAG) dall'ICAO e sostenuto dalla stragrande maggioranza delle nazioni e degli operatori del settore.

I risultati finanziari confermano la sostenibilità degli investimenti

Dal punto di vista economico, la tesi ha dimostrato che gli investimenti nelle tecnologie più consolidate (come fotovoltaico, efficientamento e mobilità elettrica) offrono un NPV positivo e un payback relativamente breve (5–6 anni). Anche integrando tecnologie più avanzate e carburanti sostenibili come i SAF e l'idrogeno, lo scenario complessivo rimane economicamente sostenibile su un orizzonte di lungo termine, con un NPV molto significativo (circa 150 M€) e payback in un arco di 8–10 anni.

Questi risultati indicano che l'adozione di tecnologie verdi non è solo benefica per l'ambiente, ma può anche diventare un investimento desiderabile per gli operatori aeroportuali e per gli investitori istituzionali, soprattutto se assistito da strumenti pubblici di sostegno come incentivi fiscali, finanziamenti a tassi agevolati e mercati di carbon pricing (es. ETS).

Inoltre, la combinazione di tecnologie complementari massimizza i benefici operativi e aumenta la resilienza finanziaria dell'intero progetto di decarbonizzazione su orizzonti temporali lunghi.

Un modello per altri aeroporti italiani e europei

La conformazione modulare e scalabile delle strategie qui analizzate rende l'approccio utilizzabile non solo per Malpensa, ma anche trasferibile ad altri aeroporti italiani e europei con caratteristiche di traffico, superfici e servizi differenti.

Questo è confermato dal fatto che oltre 300 aeroporti in Europa hanno già adottato impegni espliciti di raggiungere Net Zero al 2050, con roadmap dettagliate per l'implementazione di tecnologie e procedure di sostenibilità.

Questa diffusione di esperienze e obiettivi mostra che esiste una comunità di pratica e standard condivisi. Le tecnologie e le procedure sono adottabili in contesti diversi. La standardizzazione tecnica e regolamentare facilita la replicabilità degli interventi.

Contributo agli obiettivi climatici globali

Infine, la ricerca dimostra che gli interventi di decarbonizzazione non sono un fine in sé, ma un contributo concreto agli obiettivi climatici europei e globali, in particolare l'obiettivo di riduzione delle emissioni di almeno 55% entro il 2030 in tutti i settori economici, incluso il trasporto aereo, previsto dal Green Deal europeo. Il traguardo di Net Zero Carbon entro il 2050 sostenuto dall'ICAO, dalla Comunità Internazionale e da iniziative settoriali come il Destination 2050 Roadmap, che considera SAF e tecnologie avanzate come elementi chiave per raggiungere livelli elevati di mitigazione delle emissioni (fino all'83% di riduzione agendo su carburanti e tecnologie).

In questo senso, la transizione verde non è un mero adempimento normativo, ma rappresenta una componente strategica essenziale della competitività futura degli aeroporti, che influenzerà l'efficienza operativa, la resilienza energetica, la percezione dell'intero comparto da parte dei mercati finanziari e dei consumatori, sempre più sensibili alla sostenibilità.

Sintesi contestuale

In sintesi, la transizione verde aeroportuale è realizzabile tecnicamente, grazie a tecnologie mature o in rapida evoluzione, è sostenibile economicamente, con analisi finanziarie che mostrano NPV positivi e tempi di recupero compatibili con la pianificazione industriale di lungo periodo è trasferibile e scalabile, rendendo possibile l'adattamento ad altri scali nazionali ed europei ed è strategicamente fondamentale per conseguire obiettivi climatici definiti a livello europeo e globale, come il Net Zero 2050.

Il percorso verso un'Aviation Net Zero richiede però coordinamento costante tra operatori aeroportuali, compagnie aeree, produttori di carburanti eco compatibili, legislatori e società civile, poiché la complessità tecnica, economica e regolamentare non può essere affrontata da un singolo attore.

L'integrazione di piani di investimento, programmi di monitoraggio delle emissioni, incentivi pubblici e roadmap normative specifiche costituisce la chiave per

trasformare un obiettivo di sostenibilità in una realtà operativa e competitiva nel settore aeroportuale italiano e oltre.

Bibliografia

[1] World Resources Institute (WRI), World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), *The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard*, Revised Edition, Washington D.C., 2004.

[2] World Resources Institute (WRI), World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), *The Greenhouse Gas Protocol: Corporate Accounting and Reporting Standard*, Updated Edition, 2015.

[3] International Organization for Standardization, *ISO 14064-1: Greenhouse Gases – Part 1: Specification with Guidance at the Organization Level for Quantification and Reporting of Greenhouse Gas Emissions and Removals*, ISO, Geneva.

[4] International Organization for Standardization, *ISO 50001:2018 – Energy Management Systems – Requirements with Guidance for Use*, Geneva, 2018.

[5] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, IGES, Japan, 2006.

[6] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, Volume 2: Energy, Geneva, 2019.

[7] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Climate Change 2023: Synthesis Report*, Geneva, 2023.

[8] International Civil Aviation Organization (ICAO), *ICAO Environmental Report 2024: Aviation and Climate Change*, Montreal, Canada, 2024.

[9] International Civil Aviation Organization (ICAO), *Long Term Global Aspirational Goal (LTAG) for International Aviation: Net-Zero Carbon Emissions by 2050*, Montreal, 2022.

[10] International Civil Aviation Organization (ICAO), *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA)*, Montreal, aggiornamento 2024.

[11] International Civil Aviation Organization (ICAO), *CORSIA Sustainable Aviation Fuels (SAF) and Life Cycle Assessment Methodology*, Montreal, 2024.

[12] Airports Council International (ACI), *Airport Carbon Accreditation Annual Report 2023*, ACI Europe, Bruxelles, 2023.

[13] Airport Carbon Accreditation, *Global Standards for Carbon Management in Airports*, ACI Europe, 2024.

[14] European Union Aviation Safety Agency (EASA), *European Aviation Environmental Report 2024*, Cologne, Germany, 2024.

[15] EUROCONTROL, *European Aviation Overview 2023*, Bruxelles, 2023.

[16] EUROCONTROL, *Challenges of Growth 2023*, Brussels, 2023.

[17] International Air Transport Association (IATA), *Net Zero Roadmaps and Sustainable Aviation Fuel Outlook*, Geneva, 2024.

[18] Aviation Sustainability Forum, *Destination 2050: A Route to Net Zero European Aviation*, 2021.

[19] World Economic Forum, *Clean Skies for Tomorrow: Sustainable Aviation Fuels as a Pathway to Net Zero Aviation*, Geneva, 2023.

[20] European Commission, *The European Green Deal*, COM(2019) 640 final, Brussels, 2019.

[21] European Commission, *Fit for 55: Delivering the EU's 2030 Climate Target on the Way to Climate Neutrality*, Brussels, 2021.

[22] European Parliament and Council of the European Union, *Regulation (EU) 2023/2405 on ensuring a level playing field for sustainable air transport (ReFuelEU Aviation)*, Official Journal of the European Union, 2023.

[23] European Commission, *EU Emissions Trading System (EU ETS): Aviation*, Brussels, 2024.

[24] Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica, *Piano Nazionale Integrato Energia e Clima (PNIEC)*, Roma, 2024.

[25] Presidenza del Consiglio dei Ministri, *Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR): Missione 2 – Rivoluzione verde e transizione ecologica*, Roma, aggiornamento 2024.

[26] Ente Nazionale per l'Aviazione Civile (ENAC), *Rapporto ambientale e strategie per la sostenibilità e la decarbonizzazione del settore aeroportuale italiano*, Roma, 2025.

[27] ENEA – Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile, *Rapporto Annuale sull'Efficienza Energetica 2024*, Roma, 2024.

[28] ENEA, *Idrogeno verde: tecnologie, infrastrutture e prospettive per la transizione energetica*, Roma, 2024.

[29] Gestore dei Servizi Energetici (GSE), *Rapporto statistico solare fotovoltaico e sviluppo delle fonti rinnovabili*, Roma, 2023.

[30] Gestore dei Servizi Energetici (GSE), *Incentivi per le fonti rinnovabili e l'efficienza energetica*, Roma, 2024.

[31] SEA Milan Airports, *Bilancio di Sostenibilità 2024*, Milano, 2024.

[32] European Investment Bank (EIB), *Financing Sustainable Aviation and Green Airport Infrastructure*, Luxembourg, 2024.

[33] International Energy Agency (IEA), *Renewables 2024: Analysis and Forecast to 2030*, Paris, 2024.

[34] International Renewable Energy Agency (IRENA), *Renewable Power Generation Costs in 2023*, Abu Dhabi, 2024.

[35] Graham, A., *Managing Airports: An International Perspective*, 5th Edition, Routledge, London, 2018.

[36] Ashford, N., Mumayiz, S., Wright, P., *Airport Engineering: Planning, Design and Development of 21st Century Airports*, 4th Edition, John Wiley & Sons, Hoboken, 2011.

[37] de Neufville, R., Odoni, A., *Airport Systems: Planning, Design and Management*, 2nd Edition, McGraw-Hill, New York, 2013.

[38] Brealey, R. A., Myers, S. C., Allen, F., *Principles of Corporate Finance*, 14th Edition, McGraw-Hill, New York, 2023.

[39] Damodaran, A., *Applied Corporate Finance*, 5th Edition, Wiley, Hoboken, 2024.

[40] Ross, S. A., Westerfield, R., Jordan, B. D., *Corporate Finance*, 13th Edition, McGraw-Hill, New York, 2022.

[41] Hydrogen Council, *Hydrogen Insights: Scaling up Hydrogen Deployment*, 2024.

[42] AA.VV., *Sustainable Aviation Fuels: Technologies, Life Cycle Assessment and Future Perspectives*, arXiv preprint, 2025.

[43] ESG360, *Decarbonizzazione aeroportuale: tecnologie, strategie energetiche e transizione sostenibile*, 2024.