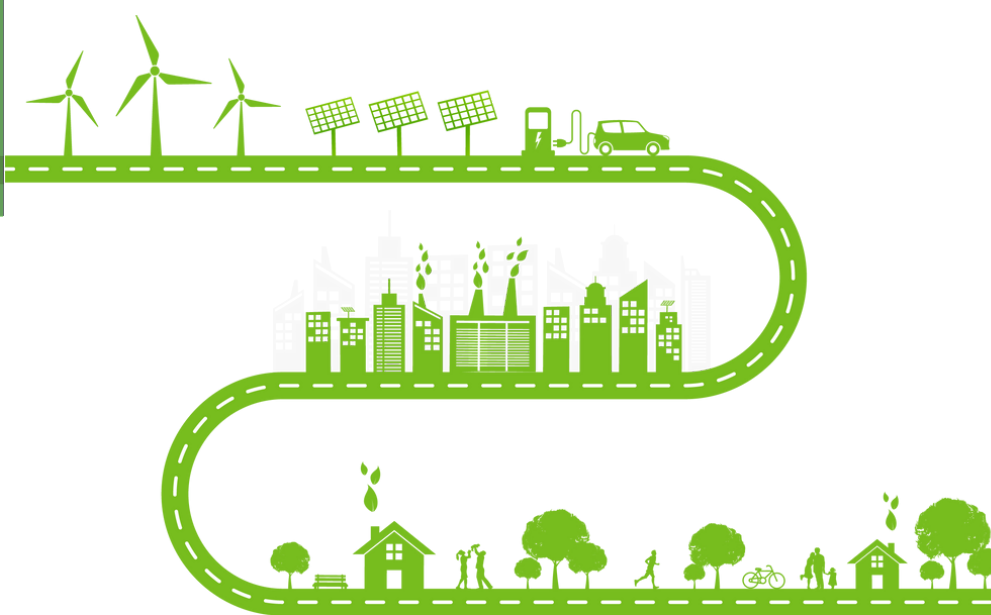
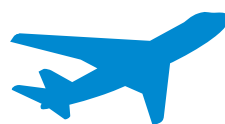




LINEE GUIDA

*L'idrogeno nella catena
logistica aeroportuale*



LINEE GUIDA

L'idrogeno nella catena logistica aeroportuale

GRUPPO DI LAVORO

COORDINATORE ENAC

Marco Trombetti

COORDINATORE ENEA

Giulia Monteleone

TEAM ENAC

Ing. Federica Boscariol, Ing. Federica Jasmeen Giura, Ing. Marco Pierini, Ing. Stefano Terenziani,
Ing. Leonardo Maria Triaca

TEAM ENEA

Ph.D. Ing. Viviana Cigolotti, Ph.D. Ing. Gabriele Loreti, Ing. Simone Mataloni, Ph.D. Ing. Roberta Mecozzi

SI RINGRAZIA LA DIREZIONE RELAZIONI ISTITUZIONALI E COMUNICAZIONE ENAC

ELABORAZIONE GRAFICA

Jessica Huber – Bachrich

Sommario

ABSTRACT	3
1 INTRODUZIONE	4
2 CONTESTO NORMATIVO.....	7
3 L'IDROGENO: UN'OPPORTUNITÀ PER GLI AEROPORTI ED I TERRITORI CIRCOSTANTI	11
3.1 LA POSIZIONE STRATEGICA DEGLI AEROPORTI E LE POLITICHE EUROPEE	12
3.2 PRODUZIONE E APPROVVIGIONAMENTO	18
3.3 ACCUMULO	23
3.4 DISTRIBUZIONE E UTILIZZO	24
4 L'INTRODUZIONE DELL'IDROGENO IN AMBITO AEROPORTUALE	38
4.1 TIPOLOGIE DI AEROPORTO E POSSIBILI USI FINALI	39
4.2 DEFINIZIONE DELLE SPECIFICHE TECNICHE DEI PROGETTI IDROGENO	42
4.3 METODOLOGIA PROPOSTA NELL'ALLEGATO 1	50
5 L'INTEGRAZIONE DELL'IDROGENO NELLE PROCEDURE AEROPORTUALI.....	52
5.1 GOVERNANCE DEL PIANO DI TRANSIZIONE	52
5.2 ANALISI DI ADEGUATEZZA DELLE INFRASTRUTTURE ESISTENTI.....	57
5.3 GESTIONE DEI RISCHI	65
6 SVILUPPO E PRESENTAZIONE DEI PROGETTI	78
7 OPPORTUNITÀ DI FINANZIAMENTO	81
8 ALLEGATI	88

Abstract

Il settore dell'aviazione contribuisce attualmente per circa il 2,5% alle emissioni globali di CO₂, una quota destinata a crescere significativamente entro il 2050, secondo le previsioni della Commissione Europea. Questo scenario impone l'adozione di misure concrete per ridurre l'impatto ambientale e accelerare la transizione verso un'aviazione sostenibile.

Gli aeroporti, in quanto ecosistemi complessi ed energivori, hanno il potenziale per diventare esempi virtuosi di sviluppo sostenibile, anche dal punto di vista economico, del proprio sistema produttivo, grazie ad innovazione tecnologica ed integrazione di fonti energetiche rinnovabili, vettori energetici a basso impatto ambientale (l'idrogeno, e-fuels, biocarburanti), sistemi di accumulo, digitalizzazione e mobilità sostenibile all'interno dell'ecosistema stesso. Inoltre, possono rappresentare al tempo stesso laboratori a cielo aperto e campi sperimentali su scala reale in cui dimostrare la sostenibilità economica ed ambientale dell'integrazione di diverse tecnologie in un nuovo sistema energetico efficiente e resiliente.

Il progetto SAVES (Sustainable Aviation Vectors for Energy transITION) si pone come obiettivo la riduzione delle emissioni di CO₂ in un contesto aeroportuale, promuovendo l'utilizzo di combustibili sostenibili per l'aviazione, quali i biocarburanti avanzati e carburanti sintetici, e lo sviluppo di tecnologie a idrogeno ed elettriche sia per la mobilità a terra che per la propulsione degli aeromobili del futuro.

L'idrogeno, soprattutto quello "verde", rappresenta uno dei vettori energetici più promettenti per la decarbonizzazione dei settori hard-to-abate, in cui rientra anche il trasporto aereo, poiché le potenzialità di ricorrere al vettore elettrico sono ad oggi ancora limitate. Grazie alla sua versatilità, alla capacità di immagazzinare e rilasciare energia senza emissioni di CO₂ e alla possibilità di essere prodotto da fonti rinnovabili, è riconosciuto a livello globale come una delle soluzioni chiave per la transizione verso la neutralità climatica al 2050.

Gli aeroporti, in quanto hub energetici e logistici, grazie al ruolo strategico che ricoprono nel sistema dei trasporti e alla loro interconnessione con diversi servizi e infrastrutture, offrono un contesto ideale per favorire la penetrazione di un'economia dell'idrogeno, con ricadute positive ed impatti in altri settori ad essi collegati, come la mobilità terrestre e l'industria locale.

In tale contesto strategico, Enac, in collaborazione con ENEA, ha prodotto le prime Linee Guida finalizzate a fornire ai gestori aeroportuali e agli operatori del settore gli strumenti necessari alla valutazione dell'introduzione dell'idrogeno nelle proprie infrastrutture in forma integrata con l'intera catena logistica nazionale.

Attraverso l'analisi di casi studio sviluppati nell'ambito del progetto SAVES, sono approfondite le motivazioni che rendono l'adozione dell'idrogeno e dei combustibili sostenibili una scelta strategica per il settore aeroportuale, sono analizzate le diverse filiere di produzione, i sistemi di stoccaggio, di trasporto e di utilizzo del nuovo vettore energetico, è data evidenza dei costi e delle opportunità, non tralasciando le criticità legate agli aspetti finanziari, legali e regolatori.

Oltre all'analisi normativa e dello stato dell'arte delle tecnologie, il documento fornisce una metodologia per valutare la fattibilità di realizzare investimenti e progetti pilota, illustrando le principali opportunità di finanziamento a livello europeo. È prevista una sezione dedicata all'integrazione dell'idrogeno nelle infrastrutture aeroportuali, evidenziando la necessità di coniugare l'efficientamento energetico e la decarbonizzazione con i rigorosi standard di Safety & Security propri del settore aeronautico.

Dall'analisi dell'intero documento si evince come la transizione verso un'aviazione a idrogeno richieda una visione di sistema, in cui istituzioni, gestori aeroportuali, operatori economici e industria collaborino per accelerare la maturazione commerciale delle soluzioni disponibili. Al tempo stesso gli aeroporti devono cogliere l'opportunità

offerta nei prossimi anni dalla crescita degli investimenti pubblici e privati volti ad incrementare la capacità produttiva e la maturità delle tecnologie dell'idrogeno, avviando da subito l'adozione delle stesse ed offrendo ai territori circostanti un'occasione unica di sviluppo industriale e occupazionale.

1 Introduzione

Il Green Deal europeo ha fissato ambiziosi obiettivi climatici per l'Unione Europea: una riduzione del 55% delle emissioni nette di gas serra entro il 2030 rispetto al 1990 e la neutralità climatica entro il 2050. Per raggiungere questi traguardi, tutti i settori, incluso quello dei trasporti, devono intraprendere una profonda trasformazione.

L'aviazione contribuisce a circa il 2-3% delle emissioni globali di CO₂ per un valore di circa 1.004 milioni di tonnellate (Mt) di CO₂ annue e, in assenza di interventi significativi, le stime indicano che le emissioni annue potrebbero triplicare entro il 2050, tenuto conto delle proiezioni di crescita del traffico aereo (basate su dati ICAO e IATA), della crescita economica globale e dei modelli di consumo di carburante. Nonostante il prevedibile miglioramento dell'efficienza dei velivoli, la necessità di ridurre le emissioni è imprescindibile, per tale motivo sono in corso numerose iniziative volte a migliorare l'efficienza energetica nel settore e a adottare nuove tecnologie a basso impatto ambientale.

Il settore aereo, in particolare, è chiamato a ripensare completamente le proprie operazioni. Il pacchetto Fit for 55, parte integrante del Green Deal europeo, fornisce un quadro normativo dettagliato che impone scadenze precise per la riduzione delle emissioni e la transizione verso una flotta più sostenibile. Tra queste, lo sviluppo di carburanti sostenibili per l'aviazione (SAF), l'elettrificazione dei velivoli per tratte brevi, l'ottimizzazione delle rotte di volo e l'adozione di tecnologie aerodinamiche avanzate. Gli aeroporti, a loro volta, dovranno adeguare le proprie infrastrutture e flotte ai nuovi standard, investendo in soluzioni innovative in grado di supportare le nuove esigenze, come, ad esempio, i futuri veicoli e velivoli a idrogeno.

Attualmente, il settore dell'aviazione civile in Italia contribuisce in misura relativamente contenuta alle emissioni nazionali di CO₂. Tuttavia, negli ultimi anni, si è registrato un incremento significativo delle emissioni legate al trasporto aereo, in linea con la crescita del traffico. In Italia sono oggi presenti circa 100 aeroporti (suddivisi tra Aeroporti certificati ed aeroporti di Aviazione Generale), che sono responsabili della movimentazione annua di circa 1 milione di tonnellate merci, 1.4 milioni di movimenti aerei e 164 milioni di passeggeri¹; tutto ciò contribuisce alla produzione annua di circa 1 milione di tonnellate di CO₂.

La sostenibilità nel settore aereo si sviluppa su due fronti: da un lato, la transizione energetica delle infrastrutture aeroportuali, che può beneficiare di tecnologie già consolidate in contesti come l'edilizia e la produzione energetica; dall'altro, la decarbonizzazione del traffico aereo, che invece richiede l'adozione di soluzioni attualmente in fase di sviluppo, spesso caratterizzate da un grado maggiore di incertezza economico-finanziaria.

In questo scenario, Enac ha identificato quattro linee d'azione strategiche per la sostenibilità dell'aviazione:

- la graduale sostituzione dei combustibili fossili;
- la transizione energetica delle infrastrutture aeroportuali;
- lo sviluppo di modelli di intermodalità e mobilità aerea avanzata;
- l'integrazione dell'idrogeno nella catena logistica aeroportuale.

¹ Fonte: Enac Dati di Traffico 2023 Direzione Vigilanza Tariffaria e Statistiche Trasporto Aereo

Secondo le previsioni dell'ICAO (International Civil Aviation Organization)² la riduzione delle emissioni nel settore aereo potrà essere ottenuta combinando diversi interventi, tra cui il miglioramento dell'efficienza aerodinamica e operativa, l'adozione di procedure di volo ottimizzate e, soprattutto, l'introduzione di carburanti sostenibili. Tra questi, l'idrogeno si distingue come una delle soluzioni più promettenti per il raggiungimento degli obiettivi di decarbonizzazione.

L'idrogeno, come ormai globalmente riconosciuto, può rappresentare una soluzione chiave per affrontare le sfide energetiche e ambientali del nostro tempo. La sua implementazione su larga scala può contribuire significativamente alla decarbonizzazione dell'economia ed alla promozione di un futuro più sostenibile.

L'elettricità prodotta da fonti rinnovabili può essere convertita in idrogeno tramite elettrolisi. L'idrogeno così prodotto può poi essere utilizzato tal quale, o dopo una conversione in combustibile sintetico, in tutti gli ambiti in cui una diretta elettrificazione risulta ancora non conveniente dal punto di vista tecnico-economico. L'idrogeno può, inoltre, anche essere riconvertito in elettricità fungendo da mezzo di accumulo energetico.

Tra le iniziative rilevanti a livello europeo, si segnala l'Alleanza Europea per l'Aviazione a Emissioni Zero (AZE) a cui partecipano costruttori di aeromobili, compagnie aeree, fornitori di carburante ed energia, autorità di regolamentazione e certificazione, aeroporti ed enti di ricerca, con l'obiettivo di preparare il mercato all'introduzione di aeromobili elettrici e a idrogeno, i cui primi voli su tratte a corto o medio raggio sono previsti al 2030. Le stime proposte nel report "Flying on electricity and hydrogen in Europe" prevedono l'entrata in servizio, entro il 2050, di 5.000 aeromobili elettrici e a idrogeno nello scenario base, fino a 23.000 aeromobili nello scenario ambizioso. La conseguente domanda annua di idrogeno si tradurrebbe in circa 2 milioni di tonnellate di idrogeno nello scenario ambizioso e di circa 1 milione in quello base, portando ad una riduzione di emissioni di CO₂ sui voli a corto e medio raggio fino al 31%.

È evidente che in questo scenario sarà necessaria una collaborazione coordinata tra tutti gli attori dell'ecosistema aeronautico, per consentire investimenti mirati e politiche adeguate a sostenere gli ambiziosi obiettivi di decarbonizzazione del settore, anche attraverso la realizzazione delle infrastrutture necessarie per l'adozione di aeromobili a idrogeno.

Gli aeroporti, infatti, dovranno poter fornire infrastrutture per la ricarica elettrica e per il rifornimento di idrogeno, comprese capacità di produzione e/o stoccaggio di idrogeno verde e di adattamento alle inevitabili differenze procedurali che l'adozione di un nuovo carburante comporterà nella logistica aeroportuale.

Queste variazioni si dovranno riflettere nel piano di sviluppo aeroportuale, in termini di pianificazione di nuove infrastrutture energetiche (impianti di produzione e stoccaggio, reti di distribuzione e rifornimento) da collocarsi in aree strategiche tenendo conto dei vincoli dovuti alle prescrizioni in materia di sicurezza e prevenzione incendi:

- integrazione di fonti di energia rinnovabile
- adeguamento delle aree operative (modifiche alle piste e alle infrastrutture a terra per la gestione delle nuove flotte)
- integrazione del trasporto sostenibile

Il piano dovrà, inevitabilmente, prevedere un processo di transizione graduale per l'introduzione delle nuove infrastrutture, pianificando in modo flessibile le fasi di sviluppo (ad esempio, l'installazione iniziale di stazioni di

² Fonte Enac : <https://www.enac.gov.it/i-carburanti-alternativi-per-laviazione/>

rifornimento e la progressiva implementazione di tecnologie a basse emissioni) e garantendo al tempo stesso che le normali operazioni dell'aeroporto possano evolversi senza comprometterne sicurezza ed efficienza.

In questo contesto, le Linee Guida sono il risultato dell'esperienza maturata nell'ambito del progetto SAVES (Sustainable Aviation Vectors for Energy tranSition), promosso da Enac in collaborazione con ENEA, ed hanno l'ambizione di voler guidare il gestore aeroportuale fornendo nozioni e metodologie per valutare le azioni da compiere anche nella prospettiva di diventare hub energetici a servizio dei territori circostanti.

SAVES ha visto selezionate le concept-note di Aeroporti di Roma e SEA Milan Airports per analizzare la possibilità di integrazione di idrogeno verde e Sustainable Aviation Fuel (SAF) nella catena logistica aeroportuale degli aeroporti di Roma Fiumicino e Milano Malpensa, fornendo un alto valore aggiunto nella stesura del presente documento.

Gli aeroporti, in quanto nodi strategici del trasporto globale, offrono un contesto ideale per l'adozione dell'idrogeno come vettore energetico sostenibile. Le loro infrastrutture possono diventare elementi chiave per la produzione, la distribuzione e l'utilizzo dell'idrogeno, contribuendo non solo alla decarbonizzazione del settore aeronautico, ma anche alla diffusione dell'idrogeno in altri ambiti industriali e di mobilità.

Attualmente, le principali barriere alla diffusione dell'idrogeno sono di natura economica e regolatoria. Tuttavia, il settore aeroportuale può svolgere un ruolo di riferimento nel superamento di tali ostacoli. Da un lato, la concentrazione di potenziali utilizzatori e infrastrutture di produzione all'interno di un unico hub consente di raggiungere economie di scala e migliorare la sostenibilità economica dei progetti. Dall'altro, il carattere altamente regolamentato degli aeroporti li rende ambienti ideali per testare e sviluppare soluzioni innovative che possano fungere da riferimento per l'evoluzione del quadro normativo.

L'introduzione dell'idrogeno negli aeroporti non è solo una scelta strategica per il settore, ma rappresenta un'opportunità unica per accelerare la transizione energetica su scala più ampia, favorendo nuovi modelli di sviluppo industriale e tecnologico.

2 Contesto normativo

DIRETTIVE E REGOLAMENTI CHIAVE

- **La direttiva sulle energie rinnovabili 2018/2001 e suo aggiornamento direttiva 2023/2413 (RED III):** pilastro fondamentale della transizione energetica europea, introduce la definizione di combustibili rinnovabili di origine non biologica (Renewable Fuels of Non biological Origin - RFNBO), che include l'idrogeno prodotto da fonti rinnovabili diverse dalla biomassa.
- **Atto delegato 2023/1184:** (delle precedenti direttive 2018/2001 e 2023/2413) definisce i criteri specifici da rispettare per poter considerare rinnovabile l'energia elettrica utilizzata dagli elettrolizzatori, in deroga al principio generale stabilito dalla RED III. Nello specifico:
 - Collegamento diretto tra impianto di produzione di energia elettrica rinnovabile ed elettrolizzatore. In questo caso l'impianto di produzione di energia rinnovabile deve essere entrato in funzione non più di 36 mesi prima dell'impianto di produzione di RFNBO (addizionalità). Va inoltre dimostrato che l'energia utilizzata per la produzione di RFNBO non provenga dalla rete;
 - Utilizzo da parte dell'elettrolizzatore di energia elettrica di rete, conteggiabile come integralmente rinnovabile, se l'impianto di produzione di RFNBO è ubicato in una zona di offerta nella quale la quota media di energia elettrica da fonti rinnovabili ha superato il 90% nell'anno civile precedente.

Vanno inoltre rispettati i seguenti requisiti:

- addizionalità: l'energia elettrica per alimentare gli elettrolizzatori può essere approvvigionata tramite contratti di fornitura (Power Purchase Agreement - PPA) che garantiscano la produzione di energia tramite impianti da fonti rinnovabili entrati in funzione non più di 36 mesi prima dell'impianto di produzione di RFNBO e che non usufruiscano di incentivi. Tale vincolo è volto a favorire uno sviluppo sinergico della penetrazione delle rinnovabili e delle tecnologie ad idrogeno. Per sostenere però il necessario rapido sviluppo di elettrolizzatori e per saturare l'utilizzo degli esistenti impianti rinnovabili, la capacità di produzione di idrogeno rinnovabile entrata in esercizio prima del 1° gennaio 2028 sarà esente dal rispetto del requisito di addizionalità fino al 2037;
 - correlazione temporale e geografica: l'energia elettrica per alimentare gli elettrolizzatori può essere approvvigionata tramite contratti di fornitura PPA che garantiscano la produzione nelle prossimità geografiche e temporali rispetto alla generazione di idrogeno. L'idea alla base è di rendere la produzione di idrogeno da fonti rinnovabili completamente svincolata da impianti convenzionali a fonti fossili e di disaccoppiare tale produzione dall'utilizzo della rete elettrica nazionale. Fino al 2030 il bilancio temporale e spaziale sarà eseguito su base mensile, fornendo maggiore flessibilità.
- **Atto delegato 2023/1185:** (secondo atto delegato delle precedenti direttive 2018/2001 e 2023/2413) stabilisce una soglia minima (riduzione del 70% rispetto ad un combustibile fossile con emissioni di 94 gCO_{2eq}/MJ) per la riduzione delle emissioni di gas a effetto serra dei combustibili

derivanti da carbonio riciclato, e fornisce una metodologia per il calcolo delle emissioni di gas serra nel ciclo di vita per i RFNBO (emissioni upstream, emissioni associate all'elettricità prelevata dalla rete, alle varie lavorazioni e quelle associate al trasporto di questi combustibili al consumatore finale).

- **Regolamento AFIR (Alternative Fuels Infrastructure Regulation) 2023/1804:** definisce obiettivi e scadenze per la creazione delle infrastrutture di rifornimento di idrogeno lungo le principali rotte di trasporto (sia terrestri che aeree) per facilitare l'adozione di veicoli e aeromobili a idrogeno. Il regolamento prevede che gli aeroporti debbano dotarsi di stazioni di rifornimento di idrogeno per velivoli, supportando la transizione verso un'aviazione a basse emissioni con un elativo scadenziario e deroghe. In particolare: nel 2030 gli Stati membri devono completare le prime fasi di distribuzione delle infrastrutture di rifornimento di idrogeno, con l'intento di coprire una rete sempre più estesa, in particolare in aree strategiche come gli aeroporti principali.
- **Direttiva 2024/1788:** che stabilisce norme comuni sui carburanti rinnovabili includendo obblighi per le compagnie aeree e fornisce una visione complessiva delle **infrastrutture per carburanti alternativi, includendo** gli aeroporti come parte del piano di rifornimento.
- **Direttiva 2024/1789:** sulle infrastrutture per carburanti alternativi nel settore aereo, definisce il quadro normativo per il trasporto e la distribuzione dell'idrogeno, regola l'accesso alle reti di idrogeno e stabilisce condizioni per il mercato dell'idrogeno. Gli aeroporti principali dovranno essere attrezzati per il rifornimento di idrogeno tenendo conto che gli obblighi legati alle infrastrutture dipenderanno dall'integrazione con le reti di idrogeno regolamentate.

NORMATIVA TECNICA

Direttive

- **Direttiva 1999/92/CE (ATEX 137):** Stabilisce i requisiti minimi per migliorare la protezione della salute e della sicurezza dei lavoratori potenzialmente esposti a rischi derivanti da atmosfere esplosive.
- **Direttiva 2014/34/UE (ATEX 114):** Definisce i requisiti per gli apparecchi e i sistemi di protezione destinati a essere utilizzati in atmosfere potenzialmente esplosive.

Decreti

- **Decreto Legislativo 9 aprile 2008, n. 81:** Include il Titolo XI, che riguarda la protezione da atmosfere esplosive, e fornisce linee guida per la sicurezza nei luoghi di lavoro.

Norme CEI EN

- **Norma CEI EN 60079-10-1:2021:** Tratta la classificazione delle aree con possibile presenza di miscele esplosive di gas, vapori o nebbie, essenziale per la corretta installazione di apparecchiature in luoghi pericolosi.
- **Norma CEI EN 60079-10-2:2015:** Fornisce linee guida per la classificazione delle aree con possibile presenza di polveri combustibili.
- **Norma CEI EN 60079-14:** Specifica i requisiti per la progettazione, selezione e installazione di apparecchiature elettriche in atmosfere esplosive.

Norme UNI/ISO

- **UNI EN ISO/IEC 80079-20-1:** Descrive le caratteristiche dell'idrogeno e le sue proprietà rilevanti per la sicurezza, fornendo indicazioni per la gestione sicura dell'idrogeno in ambienti a rischio di esplosione.
- **UNI ISO/TR 15916:2018:** Identifica i principali problemi di sicurezza, pericoli e rischi associati all'idrogeno, e descrive le proprietà dell'idrogeno rilevanti per la sicurezza.

Decreti Ministeriali

- **D.M. 03/08/2015 Approvazione di norme tecniche di prevenzione incendi, ai sensi dell'articolo 15 del decreto legislativo 8 marzo 2006, n. 139.**
- **D.M. 23/10/2018 Regola tecnica di prevenzione incendi per la progettazione, costruzione ed esercizio degli impianti di distribuzione di idrogeno per autotrazione. (18A07049) (GU Serie Generale n.257 del 05-11-2018)**
- **D.M. 07/07/2023 Ministero dell'Interno - Impianti di produzione di idrogeno mediante elettrolisi e relativi sistemi di stoccaggio**
Regola tecnica di prevenzione incendi per l'individuazione delle metodologie per l'analisi del rischio e delle misure di sicurezza antincendio da adottare per la progettazione, la realizzazione e l'esercizio di impianti di produzione di idrogeno mediante elettrolisi e relativi sistemi di stoccaggio.

NPFA (National Fire Protection Association)

- **NFPA 2:** Codice delle tecnologie dell'idrogeno, che copre la produzione, lo stoccaggio, il trasferimento e l'uso dell'idrogeno.
- **NFPA 55:** Standard per il deposito di gas compressi e criogenici, che include specifiche per l'idrogeno.

N.B. Le normative NFPA possono essere utilizzate come riferimento o guida per sviluppare pratiche di sicurezza e progettazione, specialmente in assenza di regolamenti specifici o per integrare le normative esistenti.

Analisi dei rischi: Eventuali normative non sufficienti possono essere trattate a mezzo di analisi di rischio (vedi paragrafo 5.3).

3 L'idrogeno: un'opportunità per gli aeroporti ed i territori circostanti

L'idrogeno è un vettore energetico che può contribuire significativamente alla decarbonizzazione di settori civili o industriali dove una diretta elettrificazione risulterebbe non fattibile dal punto di vista tecnico o non conveniente economicamente. L'idrogeno può essere inoltre utilizzato come mezzo di stoccaggio di energia rinnovabile in eccesso per un utilizzo successivo.

L'introduzione di una nuova strategia energetica sostenibile all'interno di un sedime aeroportuale è di primaria rilevanza, considerando l'impatto socioeconomico che le infrastrutture aeroportuali hanno sempre rivestito per il sistema Paese.

La direttiva (UE) 2024/1788 fornisce definizioni e criteri che aiutano a distinguere le diverse tipologie di idrogeno, in base al loro processo di produzione e al loro impatto ambientale, distinguendo tra *idrogeno rinnovabile*, ossia prodotto da fonti di energia rinnovabile non fossile, e *idrogeno a basse emissioni di carbonio*, ossia prodotto con un processo che prevede emissioni di gas serra significativamente inferiori rispetto alla produzione da combustibili fossili. La valutazione dell'impatto ambientale diventa fondamentale per distinguere le diverse tipologie di idrogeno.

La Strategia Europea dell'idrogeno (COM/2020/301) ha definito più in dettaglio le principali tipologie, in funzione dell'impatto ambientale della produzione e delle relative emissioni:

- idrogeno elettrolitico: prodotto attraverso l'elettrolisi dell'acqua in un elettrolizzatore alimentato ad energia elettrica, a prescindere dalla fonte di quest'ultima;
- idrogeno rinnovabile: prodotto da fonti rinnovabili, ad esempio attraverso l'elettrolisi dell'acqua in un elettrolizzatore alimentato ad energia elettrica proveniente da fonti rinnovabili, oppure mediante reforming di biogas o conversione biochimica della biomassa, se conforme ai requisiti di sostenibilità;
- idrogeno di origine fossile: prodotto attraverso vari processi le cui materie prime sono combustibili fossili, in particolare il reforming del gas naturale o la gassificazione del carbone;
- idrogeno di origine fossile con cattura del carbonio: è una sottocategoria dell'idrogeno di origine fossile caratterizzata dalla cattura dei gas serra emessi durante il processo di produzione; questo tipo di produzione con cattura dei gas serra o pirolisi genera meno emissioni rispetto all'idrogeno di origine fossile, pur sussistendo un'efficacia variabile della cattura dei gas serra;
- idrogeno a basse emissioni di carbonio ("low carbon"): include l'idrogeno di origine fossile con cattura del carbonio e l'idrogeno elettrolitico, che nell'intero ciclo di vita determinano emissioni di gas serra notevolmente inferiori rispetto alla produzione di idrogeno esistente.

A tale prima classificazione se ne è poi affiancata una ulteriore sull'idrogeno verde, utilizzata nell'ambito della tassonomia europea sugli investimenti verdi (nello specifico nel Regolamento (UE) 2021/2139) e poi adottata anche dalla normativa italiana, che ha regolato le modalità di accesso alle varie linee di finanziamento del PNRR:

- idrogeno verde: prodotto soddisfacendo il requisito di riduzione delle emissioni di gas serra nel ciclo di vita del 73.4 % rispetto ai 94 g CO_{2eq}/MJ di un combustibile fossile di riferimento, che si traduce in emissioni di gas serra nel ciclo di vita inferiori a 3 tCO_{2eq}/tH₂.

Infine, la Direttiva 2024/1788, relativa a norme comuni per i mercati interni del gas rinnovabile, del gas naturale e dell'idrogeno, fornisce una definizione più quantitativa di idrogeno a basse emissioni:

- idrogeno a basse emissioni di carbonio ("low carbon"): idrogeno il cui contenuto energetico deriva da fonti non rinnovabili e che rispetta la soglia di riduzione delle emissioni di gas a effetto serra pari al 70 % rispetto al carburante fossile di riferimento per i combustibili rinnovabili di origine non biologica.

Nel presente documento si farà riferimento principalmente ad idrogeno verde prodotto seguendo la definizione del Regolamento (UE) 2021/2139 sugli investimenti verdi.

Infine, per completezza, si riporta lo schema “a colori” di comune utilizzo:

- idrogeno grigio: prodotto a partire da fonti fossili;
- idrogeno blu: prodotto a partire da fonti fossili con conseguente cattura della CO₂ prodotta;
- idrogeno verde: prodotto da fonti rinnovabili;
- idrogeno rosa: prodotto da energia nucleare;
- idrogeno bianco: di origine geologica.

L'idrogeno si presenta naturalmente in forma gassosa a temperatura e pressione atmosferica. In questo stato però la sua bassa densità (0.083 kg/m³) rende la quantità di energia immagazzinabile per unità di massa e volume piuttosto limitata. È quindi necessario comprimere l'idrogeno gassoso fino anche a 700 bar o liquefarlo, attraverso processi altamente energivori. L'idrogeno, infatti, richiede un quantitativo ingente di energia per essere compresso, oltre ad elevate misure di sicurezza per la fase di stoccaggio. Allo stesso modo il processo di liquefazione è energivoro e lo stoccaggio deve evitare scambi termici con l'ambiente, al fine di evitare l'evaporazione del liquido. Per questi motivi è anche possibile avvalersi di cosiddetti “Hydrogen Carriers” (ad esempio ammoniaca o combustibili sintetici) che sono delle sostanze chimiche, sintetizzate a partire dall'idrogeno, che si presentano in condizioni ambiente generalmente in forma liquida, riducendo la complessità tecnica dello stoccaggio e del trasporto.

3.1 La posizione strategica degli aeroporti e le politiche europee

Le infrastrutture aeroportuali non solo facilitano il trasporto di passeggeri e merci, ma svolgono anche un ruolo cruciale nello sviluppo economico delle aree circostanti, influenzando vari settori e contribuendo alla crescita complessiva dell'economia nazionale.

Lo studio “Nomisma per Assaeroporti”³ ha codificato e analizzato le ricadute generate dagli aeroporti sui sistemi territoriali, con particolare attenzione agli effetti sul Prodotto Interno Lordo (PIL) e sull'occupazione.

I risultati del modello evidenziano l'impatto globale significativo delle infrastrutture aeroportuali, in particolare si stima che, su base annua, queste possano generare un valore aggiunto totale di 65.1 miliardi di euro e occupino circa 1.3 milioni di persone, generando un valore aggiunto in Italia pari al 3.8%.

L'analisi evidenzia l'importanza di investire nella connettività aeroportuale per stimolare la crescita economica e attrarre turisti e investimenti. All'aumentare del 10% dell'indice di connettività aeroportuale è possibile ricavare +17.0% arrivi di turisti, +2.9% occupati, +10.0% valore delle esportazioni e +0.4% di valore aggiunto. È fondamentale continuare a monitorare e analizzare questi impatti per ottimizzare le politiche di sviluppo territoriale e garantire che le infrastrutture aeroportuali possano continuare a contribuire in modo positivo all'economia nazionale.

A maggiore conferma degli assunti precedenti, possiamo considerare i dati di traffico stimati per il 2023 e per il 2024, crescenti rispetto al biennio precedente:

³ <https://www.nomisma.it/press-area/gli-aeroporti-italiani-spingono-pil-e-occupazione/>



Figura 1 - Dati di traffico 2023: Traffico passeggeri confrontati con il biennio precedente

Il volume passeggeri dei 45 aeroporti italiani aperti al traffico commerciale si è attestato a circa 200 milioni di passeggeri nel 2023, evidenziando un aumento del 20% rispetto al 2022⁴. Nel corso del 2024, si è assistito alla conferma del trend di crescita, con un raggiungimento di circa 220 milioni di viaggiatori, circa l'11,1% in più rispetto all'anno precedente⁵. Confrontando tali dati con l'andamento del mercato del trasporto aereo pre-pandemia si osserva un incremento del traffico anche rispetto all'anno 2019, confermando un maggiore utilizzo del trasporto aereo da parte degli utenti.

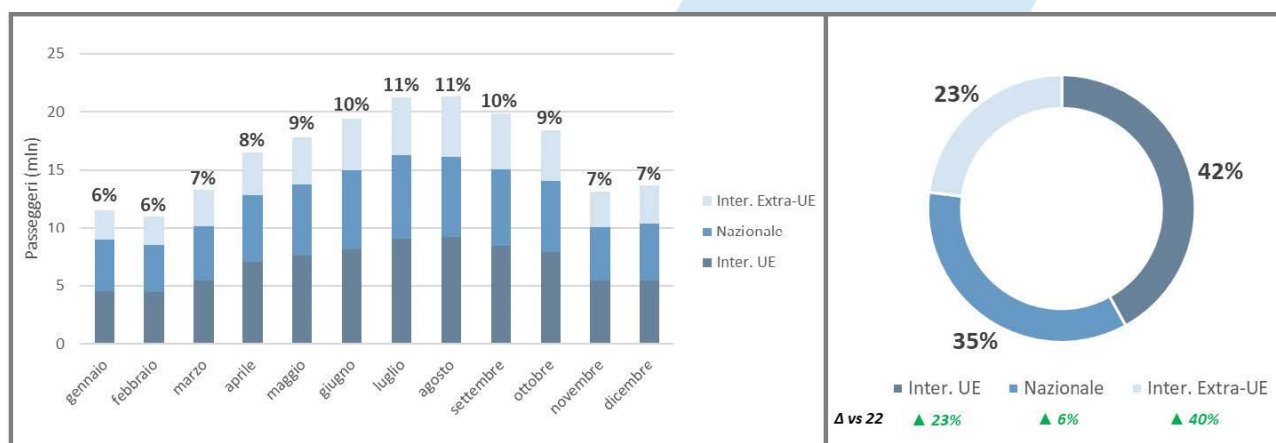


Figura 2 - Enac - Dati di traffico 2023: Distribuzione del traffico passeggeri

Oltre al significativo aumento del traffico passeggeri, il traffico merci merita particolare attenzione. Il trasporto cargo svolge infatti un ruolo cruciale nel sostenere l'economia, garantendo una rapida movimentazione di beni e prodotti a livello nazionale e internazionale.

⁴ Dati di traffico 2023 www.enac.gov.it

⁵ Dati di traffico 2024 Assaeroporti www.assaeroporti.com



Figura 3 - Enac - Dati di traffico 2023: Traffico merci confrontati con il biennio precedente

Tenendo conto di questa rilevanza, si presenta di seguito un'analisi del traffico dei 45 aeroporti aperti al traffico commerciale nel 2023. Nonostante una lieve flessione del traffico cargo nel 2023, attestatosi a 1.061.669 tonnellate, il settore ha registrato una significativa ripresa nel 2024. Con 1,25 milioni di tonnellate di merci trasportate, si è superato non solo il volume del 2022, ma anche il traguardo storico del 2017, con una crescita particolarmente marcata nei primi otto mesi dell'anno, a fronte di un'inflazione dell'1% registrata nel 2023. Confrontando tali dati con l'andamento del mercato del trasporto aereo pre-pandemia – assumendo come benchmark il 2019 – i volumi di traffico risultano pressoché invariati, con una flessione di circa 700 tonnellate (0.07%).

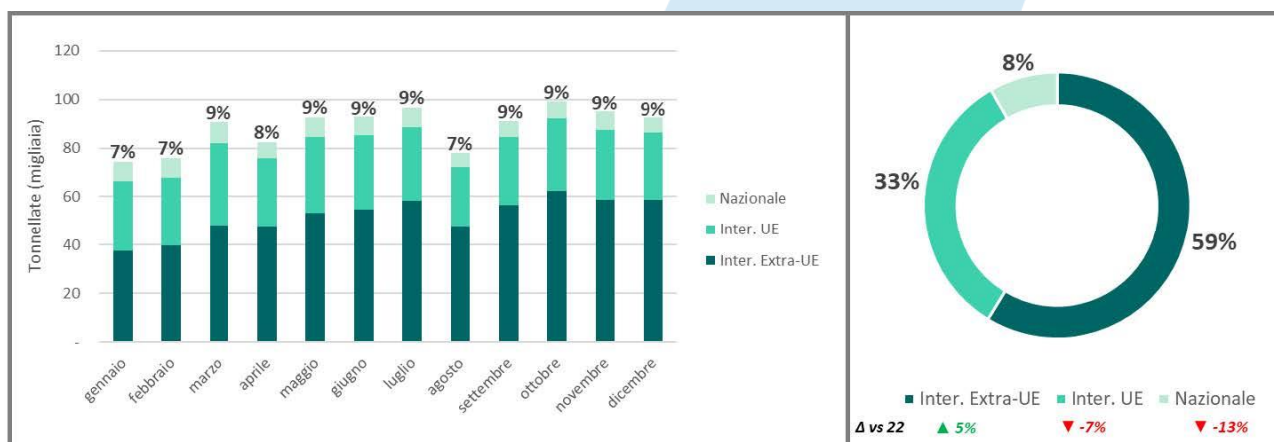


Figura 4 - Enac - Dati di traffico 2023: Distribuzione del traffico merci

Questi dati dimostrano che le infrastrutture aeroportuali non sono solo un mezzo di trasporto, ma rappresentano un motore di sviluppo economico e sociale, capace di generare opportunità e migliorare la qualità della vita nelle comunità circostanti. Investire sulle innovazioni tecnologiche in queste infrastrutture è quindi essenziale per il futuro economico del paese.

Per poter introdurre l'idrogeno nella catena logistica aeroportuale e territoriale, la molecola va in primo luogo prodotta o approvvigionata, successivamente accumulata per assecondarne la dinamica di utilizzo e, infine, distribuita e resa disponibile alle utenze finali.

L'Unione Europea sta investendo massicciamente nella transizione energetica e l'idrogeno rinnovabile è al centro di questa rivoluzione. Per facilitare la produzione, il trasporto e la distribuzione di questo vettore energetico pulito su larga scala, è stato concepito l'European Hydrogen Backbone (EHB), una rete di infrastrutture dedicata all'idrogeno.

Il piano REPowerEU, lanciato dall'UE per accelerare la transizione energetica e ridurre la dipendenza dai combustibili fossili, ha individuato nell'idrogeno rinnovabile uno dei pilastri fondamentali. L'EHB, come parte integrante di questo piano, mira a creare una rete di infrastrutture che consenta di raggiungere l'ambizioso obiettivo di produrre 10 milioni di tonnellate di idrogeno rinnovabile entro il 2030. I cinque corridoi, di seguito rappresentati, collegheranno regioni con un alto potenziale di produzione di energia rinnovabile, come il Nord Africa e i paesi nordici, favorendo così lo sviluppo di un mercato europeo dell'idrogeno e contribuendo a decarbonizzare settori chiave come l'industria e i trasporti:

- Corridoi A e B: Nord Africa e Sud Europa. Questi corridoi si concentreranno sulle connessioni tra l'Europa meridionale e il Nord Africa, sfruttando le potenzialità di produzione di idrogeno verde in regioni con abbondante energia solare.
- Corridoio C: Mar del Nord. L'infrastruttura collegherà i paesi del Nord Europa, dove sono in corso numerosi progetti per la produzione di idrogeno a partire dall'energia eolica offshore.
- Corridoio D: Regioni nordiche e baltiche. Sviluppo di un'infrastruttura per l'idrogeno nelle regioni nordiche e baltiche, dove le risorse idroelettriche possono essere utilizzate per la produzione di idrogeno verde.
- Corridoio E: Europa orientale e sud-orientale. Il corridoio collegherà i paesi dell'Europa orientale e sud-orientale, sfruttando le potenzialità di produzione di idrogeno a partire da fonti rinnovabili locali.

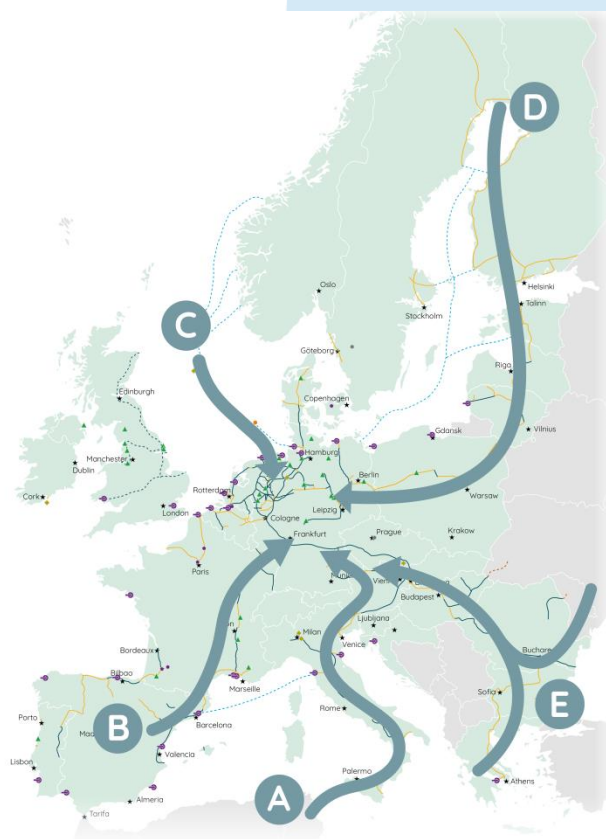


Figura 5 - EHB – European Hydrogen Backbone project

L'EHB non solo stimolerà la nascita di un mercato competitivo per l'idrogeno, ma favorirà anche una profonda trasformazione dell'industria e dei trasporti, portando a una significativa riduzione delle emissioni. Gli investimenti in questa infrastruttura strategica si tradurranno in una crescita economica sostenibile nel settore delle energie pulite, dimostrando che la transizione energetica è un'opportunità tanto quanto una necessità.

Il Corridoio A, che collega il Nord Africa all'Europa meridionale, rappresenta un'opportunità strategica per l'Italia di affermarsi come hub energetico nel cuore del Mediterraneo. La posizione geografica privilegiata del nostro Paese, unita alle sue solide infrastrutture esistenti e al know-how industriale nel settore energetico, ne fanno un partner ideale per lo sviluppo di questo ambizioso progetto.

Grazie agli investimenti in nuove infrastrutture dedicate all'idrogeno, alla promozione di collaborazioni internazionali con i paesi del Nord Africa e al sostegno alla ricerca e sviluppo di tecnologie innovative, l'Italia si sta posizionando come un attore chiave nella realizzazione del Corridoio A, battezzato come "SouthH2 Corridor" in occasione dell'accordo siglato lo scorso gennaio 2025 con i rappresentanti di Germania, Austria, Algeria e Tunisia.

Il Corridoio A, con l'Italia al centro, apre prospettive inedite per il settore aeroportuale nazionale. La crescente disponibilità di idrogeno, sia importato che prodotto localmente, rende possibile l'adozione di tecnologie innovative, nel breve periodo per la decarbonizzazione delle operazioni ground, fino ad arrivare alla conversione degli aeromobili. I gestori aeroportuali italiani possono cogliere questa opportunità per rendere i propri scali sempre più sostenibili e competitivi, anticipando le tendenze future del settore.

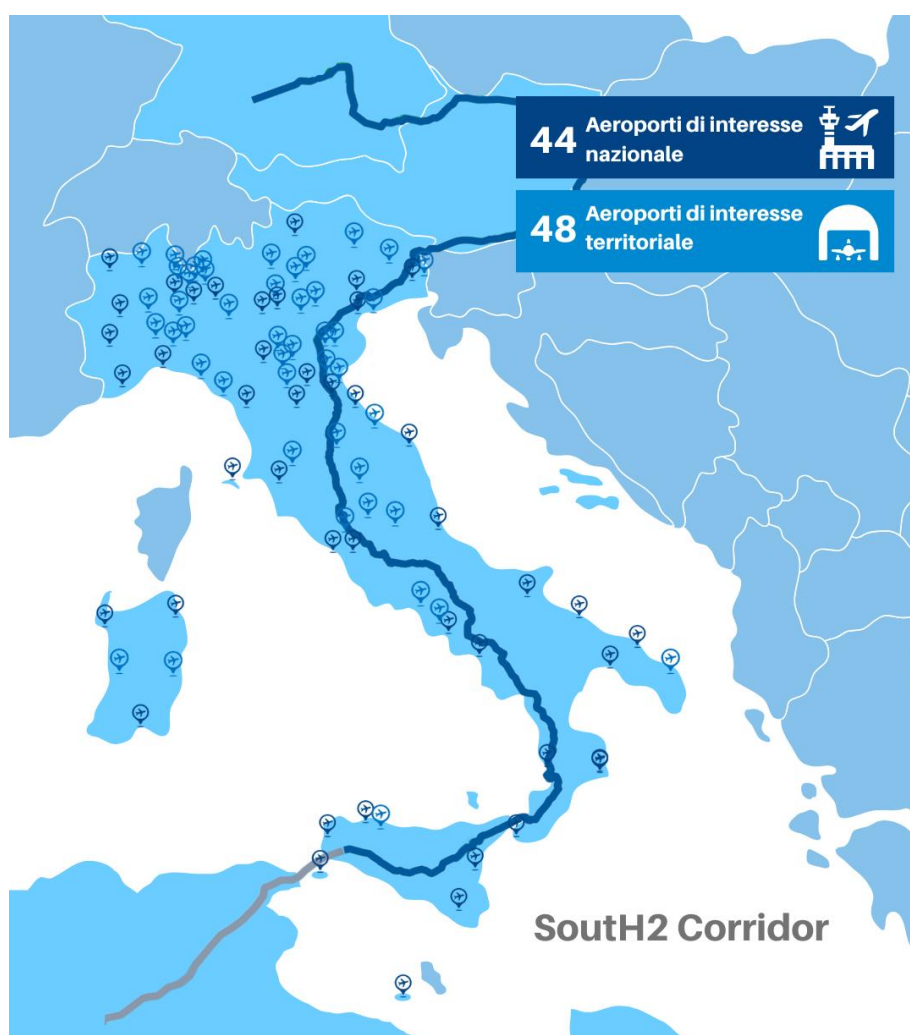


Figura 6 - SouthH2 Corridor

Il SouthH₂ corridor, che si estenderà per oltre 3.300 chilometri, è stato riconosciuto dall'Unione Europea come Progetto di Interesse Comune (PCI ⁶), sottolineandone l'importanza strategica per la transizione energetica europea. L'obiettivo principale del corridoio è rafforzare la cooperazione energetica tra i paesi coinvolti, promuovendo al contempo l'autonomia energetica e la competitività attraverso l'utilizzo dell'idrogeno verde.

Le componenti fondamentali di questo progetto includono il trasporto di idrogeno rinnovabile dal Nord Africa verso l'Europa, la collaborazione tra i paesi firmatari per lo sviluppo dell'intera filiera dell'idrogeno, il coinvolgimento di aziende interessate al settore e la realizzazione di progetti pilota.

I benefici per l'Italia sono molteplici: il Paese, rafforzando il suo ruolo di hub energetico nel Mediterraneo, ha l'opportunità di raggiungere gli obiettivi di decarbonizzazione e indipendenza energetica più velocemente, incrementando rapidamente la propria competitività attraverso l'uso dell'idrogeno verde e stimolando lo sviluppo di nuove infrastrutture e tecnologie nel settore energetico. Inoltre, gli aeroporti italiani beneficeranno nel breve

⁶ Progetti di Interesse Comune (PCI): Progetti di infrastrutture strategiche per l'Unione Europea che mirano a rafforzare il mercato interno dell'energia e a promuovere la transizione energetica.

periodo della crescente disponibilità di idrogeno per la decarbonizzazione delle operazioni a terra e, nel lungo periodo, a seguito della conversione degli aeromobili, vedranno una crescente domanda di approvvigionamento. Con tali premesse il SouthH₂ corridor rappresenterà una valida opportunità per l'Italia nel partecipare attivamente a progetti di cooperazione internazionale con i paesi del Nord Africa, consentendo in tal modo al paese di consolidare ulteriormente la sua posizione nel panorama energetico internazionale.

Al fine di orientare gli studi di fattibilità per gli aeroporti italiani, le sezioni seguenti analizzeranno nel dettaglio le fasi di produzione e approvvigionamento, accumulo e distribuzione dell'idrogeno, applicate specificatamente all'ambito del trasporto aereo.

3.2 Produzione e approvvigionamento

Il metodo più promettente per la produzione sostenibile di idrogeno rinnovabile è, ad oggi, l'elettrolisi dell'acqua, che ne permette la separazione in idrogeno e ossigeno utilizzando energia elettrica proveniente da fonti rinnovabili (come solare o eolico). Allo stato attuale esistono diverse tecnologie di elettrolisi consolidate e disponibili sul mercato: Elettrolisi alcalina, Elettrolisi PEM (a membrana a scambio protonico), Elettrolisi ad ossidi solidi (SOEC). Nell'Allegato 1 è presente una introduzione dettagliata ai sistemi di produzione di idrogeno per via elettrolitica.

3.2.1 Elettrolisi e tipi di elettrolizzatori

Gli elettrolizzatori rappresentano una tecnologia chiave per la produzione di idrogeno, con diverse opzioni disponibili in termini di costi, efficienza e maturità tecnologica:

- **Elettrolizzatori alcalini (AEL):** sono la tecnologia più consolidata e industrialmente matura, con un costo d'investimento relativamente basso (600-1.800 €/kW a seconda della scala dell'impianto). Tuttavia, i costi operativi possono risultare più elevati a causa della necessità di purificare l'idrogeno prodotto e della minore efficienza a carichi parziali.
- **Elettrolizzatori a membrana polimerica (PEMEL):** offrono maggiore flessibilità operativa e un idrogeno più puro (99,99%), ma hanno costi d'investimento superiori (1.300-2.200 €/kW), dovuti all'uso di materiali nobili e componenti più complessi. Sono ideali per applicazioni che richiedono risposta rapida e alta efficienza, come l'integrazione con energie rinnovabili.
- **Elettrolizzatori a scambio anionico (AEMEL):** tecnologia emergente con il potenziale di combinare i vantaggi degli AEL e PEM, ma ancora in fase di sviluppo. Il loro costo potrebbe essere inferiore ai PEM, ma la durabilità delle membrane rappresenta un'incognita.
- **Elettrolizzatori ad ossidi solidi (SOEC):** la tecnologia più efficiente (fino al 90%), grazie all'utilizzo di calore per ridurre il fabbisogno elettrico. Tuttavia, i costi sono ancora elevati (2.000-5.000 €/kW) e la durata operativa è limitata (10.000-20.000 ore). Sono promettenti per l'integrazione con processi industriali con calore di scarto.

In sintesi, mentre gli AEL sono la scelta più economica e collaudata per grandi impianti, i PEMEL offrono maggiore flessibilità a costi più alti. Le tecnologie emergenti, come AEMEL e SOEC, potrebbero ridurre i costi e migliorare l'efficienza in futuro, ma necessitano di ulteriori sviluppi per raggiungere una maturità industriale.

La scelta del tipo di elettrolizzatore ottimale dipende dalle caratteristiche operative dell'aeroporto, dalla disponibilità di risorse energetiche e dall'obiettivo specifico di decarbonizzazione.

Per un aeroporto di medie-grandi dimensioni, fortemente trafficato e con un fabbisogno energetico stabile, gli elettrolizzatori PEM rappresentano una soluzione versatile e affidabile. Questi sistemi sono caratterizzati da una risposta rapida, alta efficienza e compatibilità con energie rinnovabili intermittenti, come fotovoltaico ed eolico, rendendoli ideali per generare idrogeno destinato sia al rifornimento di veicoli aeroportuali che alla produzione stazionaria di energia in modalità fuel cell.

Per aeroporti regionali, o situati in contesti con minori risorse energetiche, gli elettrolizzatori alcalini (AEL) potrebbero rappresentare una scelta più economica e consolidata. La loro affidabilità e i bassi costi operativi compensano la minore flessibilità rispetto ai PEM, rendendoli adatti a produzioni di idrogeno più costanti, per esempio per alimentare generatori o sistemi di climatizzazione.

Guardando al futuro, aeroporti che mirano a diventare veri hub energetici potrebbero considerare elettrolizzatori a ossidi solidi (SOEC), in grado di produrre non solo idrogeno con elevata efficienza, ma anche calore utile per processi industriali o per il riscaldamento degli ambienti aeroportuali. Una caratteristica distintiva dei SOEC è la loro reversibilità: lo stesso dispositivo può essere utilizzato sia per generare idrogeno dall'acqua (in modalità elettrolizzatore) sia per produrre elettricità e calore utilizzando idrogeno (in modalità fuel cell). Questa versatilità li rende particolarmente adatti per aeroporti che vogliono massimizzare l'efficienza energetica e integrare l'idrogeno in una rete circolare e flessibile, anche se la tecnologia è attualmente meno competitiva economicamente.

Infine, aeroporti con un forte focus sulla sostenibilità e sull'innovazione potrebbero trovare nei sistemi AEMEL (Anion Exchange Membrane) una promettente alternativa emergente, grazie alla combinazione di efficienza e scalabilità, ideale per progetti pilota o dimostrativi.

Le principali caratteristiche, in termini di materiali costitutivi e parametri tecnico-economici delle tecnologie di elettrolisi analizzate, sono di seguito riassunte nella Tabella 1.

Tabella 1 - Confronto tra le principali tecnologie commerciali di elettrolisi dell'acqua ^{7,8,9}

	Unità	Tipologia elettrolizzatore			
		AEL	PEMEL	AEMEL	SOEC
Parametri tecnici					

⁷ Successful test operation of the world's largest high-temperature electrolysis module <https://sunfire.de/en/news/successful-test-operation-of-the-worlds-largest-high-temperature-electrolysis-module/>

⁸ Grigoriev SA et al., *Current status, research trends, and challenges in water electrolysis science and technology*, *International Journal of Hydrogen Energy*

⁹ IRENA (2020), *Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5 °C Climate Goal*

Temperatura	(°C)	70-90	60-80	50-80	700-900
Pressione	(bar)	1-30	1-35	1-35	1
Purezza H₂ prodotto	(%)	99,9 %-99.998%	99,9 %-99.9999%	99.9%-99.999%	99,99 %
Consumo energetico (stack)	(kWh _e /kg _{H2})	47-66	47-66	51.5-66	35-50
Consumo energetico (sistema)	(kWh _e /kg _{H2})	50-78	50-83	57-69	40-50
Efficienza LHV (sistema)	(%)	50-68	50-68	52-67	75-85
Taglia media dello stack	(kW _e)	1000	1000	2.5	5
Vita utile dello stack	(ore)	60.000-90.000	60.000-80.000	> 5.000	<20.000
Variazioni di carico	(%)	15-100	5-120	5-100	30-120
Start-up a freddo	(min)	<50	<20	<20	300-500
Parametri economici					
CAPEX impianto	(€/kW _e)	600	900	1000	2100
O&M^a	€/(kg/d)/y	50	41	34	410
^a Il costo di operazione e manutenzione è calcolato come la media sui primi dieci anni di funzionamento del sistema. I potenziali costi di sostituzione delle celle sono inclusi nei costi di O&M. I costi dell'elettricità non sono inclusi nei costi di O&M.					

3.2.2 Altri metodi di approvvigionamento

L'introduzione dell'idrogeno come vettore energetico nel settore aeroportuale richiede una valutazione dettagliata degli schemi di approvvigionamento possibili, sia per soddisfare le esigenze immediate sia per poter pianificare i successivi adempimenti a lungo termine. Le opzioni variano in base alla collocazione geografica degli aeroporti, alle diverse modalità di trasporto (navi, pipeline, veicoli cisterna) e all'impiego di Hydrogen Carriers, come l'ammoniaca e il metanolo, che permettono lo stoccaggio e la distribuzione in forma più stabile con successivi impianti di separazione in loco.

Le tre modalità primarie per il trasporto di idrogeno verso gli hub aeroportuali sono:

1. **Trasporto via Nave:** Il trasporto navale è particolarmente rilevante per aeroporti situati in prossimità di porti o aree costiere. Le navi criogeniche sono attualmente tra i mezzi più affidabili per trasportare grandi volumi di idrogeno liquido a basse temperature. Tuttavia, una sfida è rappresentata dalla necessità di infrastrutture criogeniche a destinazione per scaricare, immagazzinare e distribuire in sicurezza l'idrogeno in loco. Questo metodo è particolarmente adatto a un approvvigionamento centralizzato per grandi aeroporti.
2. **Pipeline:** Le pipeline per idrogeno rappresentano un'infrastruttura di approvvigionamento vantaggiosa per l'utilizzo a lungo termine, in particolare per aeroporti di grandi dimensioni che richiedono flussi continui e

sicuri. Il costo iniziale per l'installazione è elevato, e occorre fare i conti con i limiti geografici e le complessità di una rete che raggiunga aeroporti spesso lontani dai centri di produzione. Le pipeline consentono però una maggiore stabilità del rifornimento e una riduzione dei rischi legati al trasporto su strada e su mare.

3. **Carro Bombolaio (Veicoli Cisterna):** Per aeroporti di medie o piccole dimensioni, il trasporto via cisterna rappresenta una soluzione flessibile ed economicamente vantaggiosa, in particolare per volumi non eccessivi di idrogeno. I veicoli cisterna trasportano sia idrogeno compresso che liquido e richiedono infrastrutture di rifornimento minime, facilitando una distribuzione flessibile e rapida. Tuttavia, è necessario considerare i rischi legati alla sicurezza e alla volatilità dell'idrogeno, che richiedono standard elevati per il trasporto su gomma.

Un'alternativa emergente per l'approvvigionamento aeroportuale è rappresentata dagli Hydrogen Carriers, come l'ammoniaca e il metanolo, che consentono di stoccare e trasportare l'idrogeno in forme più sicure e gestibili. Questi vettori richiedono impianti di separazione sul sito aeroportuale per trasformare l'idrogeno in forma gassosa o liquida. Sebbene richiedano investimenti infrastrutturali, gli Hydrogen Carriers riducono significativamente i rischi di perdita e volatilità e possono supportare una rete di approvvigionamento su distanze maggiori.

L'integrazione dell'idrogeno nel sistema aeroportuale, tuttavia, richiede soluzioni di trasporto e stoccaggio specifiche e flessibili nel tempo. Considerando un orizzonte temporale medio-breve che lungo periodo, di seguito si presenta un'analisi delle diverse opzioni di approvvigionamento di idrogeno. L'obiettivo è delineare una strategia graduale e sostenibile per la transizione verso l'applicabilità di tale vettore energetico:

1. Medio-Breve Periodo (fino a dieci anni):

- Nel medio-breve termine, si prevede un uso misto di trasporto su gomma (veicoli cisterna) e trasporto marittimo, particolarmente per aeroporti costieri. Questa strategia è in grado di soddisfare esigenze temporanee, soprattutto in vista dell'evoluzione di tecnologie di rifornimento e di stoccaggio.
- Per alcuni aeroporti potrebbe essere vantaggioso avviare il trasporto di idrogeno tramite Hydrogen Carriers, in parallelo alla costruzione di impianti di separazione, promuovendo così l'integrazione graduale di questo approccio.

2. Lungo Periodo (oltre i dieci anni):

- Nel lungo periodo, le pipeline rappresentano l'obiettivo primario per aeroporti di grandi dimensioni, consentendo un flusso costante di idrogeno senza interruzioni. Parallelamente, si prevede un aumento della capacità produttiva e di stoccaggio di idrogeno nei porti, che potrebbe favorire aeroporti distanti dal mare grazie a una rete integrata di trasporto navale e pipeline.
- Anche l'utilizzo di Hydrogen Carriers come ammoniaca o metanolo, con impianti di separazione, rappresenta un'opzione di approvvigionamento sostenibile per aeroporti di media dimensione.

La scelta dell'Hydrogen Carrier ottimale è cruciale per garantire il trasporto, lo stoccaggio e l'utilizzo sicuro ed efficiente dell'idrogeno. Sul mercato sono disponibili diverse opzioni, ognuna con caratteristiche specifiche in termini di densità energetica, modalità di trasporto, condizioni operative e costi. La Tabella 2 riassume i principali tipi di carrier, evidenziandone vantaggi, limiti e applicazioni potenziali.

L'idrogeno può essere utilizzato tecnologicamente in due forme principali: **gassoso** e **liquido**. L'idrogeno gassoso è comunemente stoccato e trasportato ad alta pressione (fino a 700 bar), rendendolo adatto a veicoli e applicazioni a breve distanza grazie ai minori costi di produzione. L'idrogeno liquido, ottenuto raffreddandolo a -253 °C, offre una densità volumetrica superiore, rendendolo ideale per applicazioni che richiedono grandi quantità di energia, come il trasporto a lungo raggio o l'aviazione futura.

Tabella 2 - Confronto tra i principali Hydrogen Carriers

Vettore per il trasporto dell'Idrogeno	Vantaggi	Sfide
Ammoniaca: L'ammoniaca (NH ₃) è un composto chimico formato da azoto e idrogeno, caratterizzato da un odore pungente. È un gas incolore, altamente solubile in acqua. L'ammoniaca liquida viene immagazzinata a temperatura ambiente sotto alta pressione o a -34°C sotto pressione atmosferica. NH ₃ è attualmente il secondo prodotto chimico più prodotto a livello globale, con una capacità di produzione globale di ~230 Mt all'anno. Circa 20 Mt all'anno di ammoniaca vengono commercializzati a livello globale. L'utilizzo principale oggi è per la produzione di fertilizzanti. L'ammoniaca viene prodotta tramite SMR (vapore di ammoniaca) ed è responsabile di ~5% delle emissioni globali.	- Vettore di H₂ con il più alto numero di progetti orientati all'export annunciati a livello globale. - Ha un'eccellente densità di H₂ (18.6 MJ/kg). - Facile da trasportare in tutto il mondo in grandi quantità come avviene oggi. - Costi della catena di approvvigionamento attraenti grazie all'uso di vettori su scala mondiale. - Esistono già infrastrutture e molti piani concreti per espandere la loro capacità. - Può essere utilizzato non solo come vettore di H₂ ma anche come materia prima per decarbonizzare fertilizzanti e prodotti chimici. - Questo vettore offre costi competitivi se non è necessaria la riconversione a H₂ gassoso. - È privo di carbonio.	- Tossico e infiammabile. - Richiede precauzioni speciali di manipolazione e sicurezza, ma l'industria ha una vasta esperienza nella gestione sicura. - Per essere utilizzato come vettore di H₂, l'ammoniaca deve essere riconvertita in H₂. Questa tecnologia esiste, ma il numero di reattori su larga scala commerciali non è numeroso. L'IEA classifica la riconversione dell'NH₃ con TRL 4. - Produce emissioni di NO_x quando si brucia NH₃ (ad esempio, nei trasporti e nelle applicazioni energetiche).
Metanolo: Il metanolo (CH ₃ OH) è il più semplice alcol, costituito da un gruppo metile legato a un gruppo ossidrilico. È un liquido incolore, volatile e altamente infiammabile. Liquido a temperatura ambiente, il metanolo è facile da immagazzinare e trasportare. La riconversione a H ₂ comporta emissioni di CO ₂ .	- Densità energetica leggermente superiore a quella dell'ammoniaca (20,1 MJ/kg). - Più sicuro dell'idrogeno. - Già spedito oggi in grandi quantità e su lunghe distanze. - Trasportato a condizioni ambientali. - È ampiamente disponibile, combustibile commercialmente disponibile e facile da ottenere. - Può essere utilizzato non solo come vettore di H₂ ma anche come materia prima per prodotti chimici, e presto come nuovo combustibile verde per la navigazione.	- È tossico, infiammabile e corrosivo, ma l'industria ha una vasta esperienza nella gestione sicura. - Contiene carbonio e, per essere climaticamente neutrale, la fonte di CO₂ per la produzione di metanolo dovrebbe preferibilmente essere biogenica, cattura diretta dell'aria o processo industriale. - Richiede grandi quantità di CO₂ a basso costo a monte, e compete con materie prime a base biologica per i prodotti finali (ad esempio, olefine).
Metano: CH ₄ (metano) è il più semplice idrocarburo alcano, costituito da un atomo di carbonio e quattro di idrogeno. È un gas incolore e inodore, principale componente del gas naturale, utilizzato come combustibile e fonte energetica, nonché come materia prima per processi industriali e chimici. Il gas H ₂ viene ottenuto dal metano tramite diverse vie: SMR, ATR e Pirolisi.	- Utilizza gran parte della nostra fornitura energetica a livello mondiale oggi. - Può essere utilizzato nelle infrastrutture esistenti (gasdotti, centrali elettriche, ecc.). - Diverse qualità: e-metano, biometano, metano fossile.	- La CO₂ o il carbonio nero nel caso della pirolisi devono essere catturati e stoccati o utilizzati. Questo è l'unico modo per ottenere un sistema sostenibile con un circuito di ritorno, ecc.
LOHC: Liquid Organic Hydrogen Carrier o composti organici liquidi. Gli LOHC assorbono l'idrogeno mediante processi chimici di idrogenazione e lo rilasciano tramite deidrogenazione, permettendo un trasporto simile a quello dei combustibili liquidi tradizionali senza necessità di serbatoi criogenici o compressione ad alta pressione.	- Legando chimicamente l'H₂ a un composto organico stabile, questo elimina la necessità di compressione e lo rende più sicuro e conveniente per il trasporto in condizioni ambientali. - Le infrastrutture petrolifere esistenti (navi, terminal, gasdotti, ecc.) possono facilmente trasportare LOHC. - Consente un facile trasporto dell'H₂ oltre il terminal ricevente. - Diverse opzioni disponibili. - L'energia richiesta per la riconversione può essere significativamente ridotta quando c'è un approvvigionamento economico di calore (integrazione con siti industriali).	- Alcuni vettori LOHC possono essere tossici e/o pericolosi per la salute. - Sono necessarie innovazione e sforzi per la preparazione del vettore e la deidrogenazione. - La fase di preparazione (idrogenazione) è commercialmente disponibile, mentre la fase di riconversione (deidrogenazione) deve ancora essere dimostrata. - Basso contenuto di idrogeno in massa: il trasporto e lo stoccaggio all'ingrosso comportano grandi volumi e pesi.
Idrogeno Liquido (LH₂):	- La massima densità energetica in massa (1.42	- Processo costoso e ad alta intensità

Vettore per il trasporto dell'Idrogeno	Vantaggi	Sfide
LH₂ è la forma liquida dell'idrogeno molecolare (H₂), ottenuta raffreddandolo a temperature criogeniche (-253°C). È utilizzato come combustibile ad alta densità energetica in applicazioni spaziali, trasporto e stoccaggio di energia, grazie alla sua elevata capacità di immagazzinare energia per unità di massa.	MJ/litro). - L'H₂ viene trasportato in forma ad alta purezza (minime impurità di H₂). - Non è necessaria alcuna conversione/riconversione nel processo. - Il consumo energetico per la trasformazione in H₂ gassoso è basso, il potere criogenico del processo di rigassificazione potrebbe essere (parzialmente) recuperato.	energetica. - Fase di preparazione ad alta energia (liquefazione) (anche la temperatura di -253°C e le perdite nel processo). - Trasporto criogenico: è necessaria l'isolazione, perdite per evaporazione, il trasporto non è commercialmente disponibile per lunghe distanze. - Il trasporto di grandi quantità di LH₂ richiederebbe maggiori sforzi in R&D nel campo dei materiali. - Necessita di ricompressione dell'H₂ durante lo scarico. - Altamente criogenico. - Altamente infiammabile, ma questo è più uno svantaggio del vettore piuttosto che un ostacolo allo sviluppo della tecnologia. - LH₂ è soggetto a perdite per evaporazione; se il gas non viene utilizzato, la pressione dell'idrogeno deve essere rilasciata.
H₂ Compresso: H₂ compresso è idrogeno molecolare (H₂) immagazzinato a pressioni elevate, solitamente tra 200 e 700 bar, in bombole o serbatoi. È utilizzato come combustibile per celle a combustibile, veicoli e applicazioni industriali, grazie alla sua elevata densità energetica per unità di peso.	- L'assenza di qualsiasi fase di conversione nei suoi processi di imballaggio e disimballaggio potrebbe favorirlo abbastanza da superare gli svantaggi in termini di breve distanza.	- Ha la densità di H₂ più bassa tra i vettori, impedendo così la spedizione a lunga distanza di sfere di stoccaggio. - Altamente infiammabile, ma questo è più uno svantaggio del vettore piuttosto che un ostacolo allo sviluppo della tecnologia.

3.3 Accumulo

Lo stoccaggio dell'idrogeno in pressione riveste un ruolo fondamentale per garantire il rifornimento efficace dei veicoli e supportare le operazioni aeroportuali. È cruciale scegliere e dimensionare con attenzione l'intero sistema di stoccaggio in funzione delle esigenze specifiche, in particolare della pressione richiesta e delle applicazioni previste.

Per lo stoccaggio dell'idrogeno in forma gassosa, si distinguono tre soluzioni principali: serbatoi in pressione, sistemi a cascata e idruri metallici. Tra queste, la tecnologia più consolidata è rappresentata dallo stoccaggio mediante serbatoi in pressione, che oggi si suddividono in quattro tipologie principali, classificate in base all'applicazione e al costo:

- **Tipologia 1:** Serbatoi cilindrici realizzati interamente in acciaio, con una capacità tipica di 500 kg e in grado di stoccare fino a 25 Nm³ di idrogeno a una pressione di 300 bar. Questa tipologia è particolarmente adatta per applicazioni stazionarie, grazie alla sua semplicità costruttiva e alla robustezza, sebbene presenti una bassa densità gravimetrica.
- **Tipologia 2:** Serbatoi in acciaio senza saldature, avvolti con fibra di carbonio, progettati per stoccaggi a pressioni inferiori ai 1.000 bar. Con una pressione media operativa di 875 bar, questi serbatoi risultano ideali per applicazioni con sistemi di stoccaggio a cascata, offrendo un buon compromesso tra efficienza e resistenza.

- **Tipologie 3 e 4:** Questi serbatoi sono progettati specificamente per il trasporto di idrogeno tramite container. La tipologia 3 è costituita da un materiale composito con rivestimento in metallo, mentre la tipologia 4 è realizzata interamente in materiale composito. Questi serbatoi, pur avendo un maggiore ingombro rispetto alla tipologia 1, stanno guadagnando interesse per le stazioni di rifornimento grazie alla loro leggerezza e alla capacità di operare a pressioni variabili.

I sistemi di stoccaggio a cascata rappresentano un'altra opzione praticabile, sebbene presentino alcuni limiti, come il raggiungimento della pressione di equilibrio tra i serbatoi. In tali sistemi, l'utilizzo di un booster è spesso necessario per compensare la riduzione di pressione. Tuttavia, la capacità complessiva di un sistema a cascata risulta generalmente inferiore rispetto a quella di un singolo serbatoio ad alta pressione.

Un'ulteriore alternativa è rappresentata dagli idruri metallici, una tecnologia consolidata ma ancora oggetto di ricerca e sviluppo. Gli idruri metallici sfruttano la capacità di alcuni elementi di transizione e delle loro leghe di reagire con l'idrogeno gassoso, formando composti chimici stabili. Il processo di adsorbimento è esotermico, mentre il desorbimento è endotermico, rendendo il sistema reversibile e quindi utile per lo stoccaggio, ovviamente richiedendo precisi sistemi di controllo del calore. La pressione di equilibrio, necessaria per il rilascio dell'idrogeno, dipende dalla composizione chimica del materiale e dalla temperatura operativa.

Nonostante i vantaggi in termini di sicurezza, come la bassa pressione di stoccaggio compatibile con quella dell'elettrolizzatore, gli idruri metallici mostrano limiti significativi per applicazioni mobili a causa della loro bassa densità gravimetrica di idrogeno.

In conclusione, la scelta della tecnologia di stoccaggio più appropriata dipende dalle specifiche necessità operative e dalle caratteristiche dell'aeroporto, con particolare attenzione alla sicurezza, alla capacità di stoccaggio, ai costi complessivi e agli spazi disponibili da poter dedicare allo scopo.

3.4 Distribuzione e utilizzo

L'implementazione di sistemi a idrogeno negli aeroporti richiede lo sviluppo di un'infrastruttura complessa e articolata, che consenta il trasporto, la compressione e l'utilizzo efficiente e sicuro di questo vettore energetico. Questa infrastruttura comprende diverse componenti chiave, tra cui reti di tubazioni per la distribuzione, stazioni di compressione per l'innalzamento della pressione, sistemi di utilizzo stazionario basati su celle a combustibile e stazioni di rifornimento per l'utilizzo in mobilità. Di seguito, verranno analizzate nel dettaglio le caratteristiche e le tecnologie principali di ciascuna di queste componenti, evidenziandone le specificità e le applicazioni in ambito aeroportuale.

3.4.1 Piping per la distribuzione di idrogeno

La distribuzione dell'idrogeno avviene tramite una rete di tubazioni (piping) progettate per garantire sicurezza ed efficienza. Il piping per l'idrogeno richiede materiali specifici, come acciai inossidabili o leghe di alluminio, per

prevenire fenomeni di fragilità da idrogeno e mantenere l'integrità strutturale a pressioni elevate. Le tubazioni devono inoltre essere certificate secondo standard internazionali, come l'ASME¹⁰ B31.12 per sistemi a idrogeno.

Le reti di piping sono suddivise in sistemi a bassa e alta pressione in base alle necessità operative. La bassa pressione ($\approx 10\text{-}20$ bar) è tipicamente utilizzata per la distribuzione primaria verso le unità di stoccaggio o le stazioni di compressione. L'alta pressione ($\approx 350\text{-}700$ bar) è necessaria per alimentare direttamente i distributori per veicoli o per il rifornimento di serbatoi destinati ad applicazioni mobili. Sistemi di monitoraggio e valvole di sicurezza, spesso automatizzate, garantiscono il controllo delle perdite e la prevenzione di situazioni di rischio.

3.4.2 Stazioni di compressione

Le stazioni di compressione svolgono un ruolo cruciale nel processo di distribuzione dell'idrogeno. Queste infrastrutture aumentano la pressione dell'idrogeno per consentirne lo stoccaggio efficiente e l'erogazione ai veicoli. Le tecnologie più comuni includono compressori volumetrici alternativi, a membrana e ionici.

- **Compressori volumetrici alternativi:** utilizzati per pressioni medio-alte, offrono alta efficienza e affidabilità. Questi compressori lavorano a più stadi per raggiungere pressioni fino a 900 bar, necessarie per il rifornimento degli FCEV.
- **Compressori a membrana:** ideali per applicazioni sensibili come l'idrogeno, grazie alla loro capacità di eliminare il rischio di perdite.
- **Compressori ionici:** rappresentano la tecnologia più avanzata, con efficienze energetiche fino a 1.5 kWh/kg_{H2} e pressioni di uscita di 700 bar.

Le stazioni di compressione sono spesso integrate con sistemi di raffreddamento per mantenere l'idrogeno a temperature operative sicure durante la compressione. Inoltre, sono equipaggiate con sensori per monitorare i parametri critici, come pressione e temperatura, in tempo reale. Questi sistemi garantiscono il rispetto delle normative di sicurezza e l'ottimizzazione del consumo energetico.

3.4.3 Utilizzo dell'idrogeno per applicazioni fisse

In ambito stazionario, l'idrogeno può essere usato per alimentare celle a combustibile (Fuel Cells, FC) che forniscono energia elettrica e termica per strutture come terminal, hangar e sistemi di controllo. Le celle a combustibile sono disponibili in diverse configurazioni tecnologiche. Le PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) sono particolarmente adatte a sistemi che richiedono avvii rapidi e risposte dinamiche, rendendole ideali per il supporto energetico temporaneo o di emergenza. Le SOFC (Solid Oxide Fuel Cell), d'altra parte, operano a temperature più elevate e offrono maggiore efficienza termica, rappresentando un'opzione vantaggiosa per il funzionamento continuo e l'integrazione con reti di calore e freddo. L'energia termica residua prodotta dalle SOFC, infatti, può essere utilizzata per il riscaldamento degli edifici aeroportuali o per alimentare sistemi di assorbimento per la climatizzazione. Sistemi di climatizzazione alternativi, inoltre, potrebbero prevedere l'uso di caldaie a idrogeno o

¹⁰ ASME B31.12: norma tecnica dell'American Society of Mechanical Engineers (ASME) che definisce i requisiti per la progettazione, costruzione, ispezione e manutenzione di tubazioni e condotte per idrogeno.

blend metano-idrogeno, offrendo un'alternativa pulita ed efficiente ai tradizionali sistemi di riscaldamento a gas naturale. Questi impianti sfruttano la combustione dell'idrogeno per generare calore, eliminando le emissioni di CO₂ e riducendo significativamente la produzione di ossidi di azoto (NO_x) grazie a processi di combustione avanzati che possono includere l'utilizzo di catalizzatori. La facilità di integrazione delle caldaie a idrogeno è facilitata dalla loro compatibilità con le infrastrutture esistenti, richiedendo modifiche minime agli impianti di riscaldamento attuali. Inoltre, la modularità di questi sistemi consente un'implementazione graduale, adattandosi alle diverse esigenze energetiche degli edifici aeroportuali.

Un'applicazione significativa è rappresentata anche dall'uso delle celle a combustibile per alimentare i sistemi critici di un aeroporto, come l'illuminazione delle piste, i sistemi radar e i server informatici. Questi dispositivi richiedono continuità operativa e un'alimentazione affidabile, caratteristiche che le celle a combustibile garantiscono grazie alla loro indipendenza dalla rete elettrica e alla capacità di funzionare con combustibili di backup.

Sempre in ambito stazionario di supporto a terra, le Ground Power Units alimentate ad idrogeno (hGPU) rappresentano un'innovazione significativa nel supporto energetico delle operazioni a terra degli aeromobili. Il progetto europeo TULIPS sta dimostrando, presso gli aeroporti di Amsterdam Schiphol e Torino, come le GPU alimentate a celle a combustibile possano fornire energia elettrica in modo efficiente e sostenibile¹¹. Queste unità sostituiscono le GPU tradizionali alimentate a diesel, riducendo drasticamente le emissioni locali. La facile integrazione delle hGPU è resa possibile dalle dimensioni e dall'ingombro simile ai mezzi tradizionali, oltre che dalla capacità di connettersi direttamente alle infrastrutture di alimentazione elettrica esistenti.

3.4.4 Utilizzo dell'idrogeno per applicazioni mobili

Ad oggi, l'idrogeno è protagonista soprattutto nel settore della mobilità terrestre, con applicazioni che includono veicoli a celle a combustibile (Fuel Cell Electric Vehicles, FCEV) utilizzati per il trasporto passeggeri, il rifornimento aeronautico e la logistica interna. Questi veicoli, che comprendono autobus, nastri per bagagli e mezzi di servizio, offrono tempi di rifornimento rapidi e un'autonomia elevata, caratteristiche ideali per operazioni continuative e intensive. Tuttavia, guardando al futuro, l'idrogeno è destinato a rivestire un ruolo chiave anche nella propulsione aerea. Sulla base di recenti piani di sviluppo dei maggiori costruttori di aeromobili, entro il 2035, ci si aspetta che l'idrogeno liquido diventi un'opzione concreta per alimentare i primi aeromobili a emissioni zero, con un'espansione significativa prevista entro il 2050.

Questa visione proietta l'idrogeno oltre il suo attuale utilizzo su ruote, posizionandolo come un vettore energetico cruciale per la sostenibilità e l'efficienza energetica degli aeroporti, che si configurano sempre più come hub multimodali per la produzione, lo stoccaggio e l'utilizzo di idrogeno.

Mobilità Terrestre

¹¹ TULIPS <https://tulips-greenairports.eu/>

Per quanto riguarda la mobilità terrestre, l'idrogeno si rivela particolarmente efficace per una gamma di veicoli operanti nelle aree aeroportuali, selezionati in base alla loro disponibilità sul mercato ed al livello di maturità della tecnologia:

- a) **Automobili:** taxi, veicoli della flotta dirigenziale e mezzi di servizio.
- b) **Minivan:** utilizzati per il trasporto di piccoli gruppi e per esigenze logistiche leggere.
- c) **Furgoni:** dedicati al trasporto di materiali e attrezzature.
- d) **Autobus:** impiegati per il trasporto collettivo di passeggeri all'interno del sedime aeroportuale.
- e) **Trattori aeroportuali:** specializzati nella movimentazione di bagagli e merci lungo piste e aree di carico.
- f) **Material Handling:** veicoli specifici per la movimentazione nelle aree di carico e scarico.

Questi mezzi rappresentano non solo le flotte più numerose, ma anche quelle per cui la transizione all'idrogeno è più agevolmente implementabile grazie alle tecnologie già disponibili. Tuttavia, per i veicoli destinati all'area airside si ritiene che la conversione all'elettrico rappresenti una soluzione oggi più vantaggiosa, con un impatto immediato sulla decarbonizzazione delle operazioni aeroportuali.

Hydrogen Refueling Stations (HRS) per i veicoli

Le Hydrogen Refueling Stations (HRS) sono infrastrutture progettate per il rifornimento di veicoli a celle a combustibile (FCEV). Implementano processi di ricezione, stoccaggio ad alta pressione (350/700 bar), condizionamento (raffreddamento) ed erogazione di idrogeno, garantendo la sicurezza tramite protocolli e sistemi di monitoraggio dedicati. L'idrogeno può essere fornito (liquido/gassoso) o prodotto in loco (elettrolisi/reforming). Le HRS possono integrare funzionalità avanzate come la purificazione, il recupero dell'idrogeno non erogato e il monitoraggio delle emissioni. La progettazione e implementazione delle HRS richiede un'attenta pianificazione per soddisfare criteri di sicurezza, efficienza e adattabilità alle specifiche esigenze operative, con un ruolo crescente nel sostenere la decarbonizzazione delle attività aeroportuali.

Le HRS aeroportuali possono essere configurate in diverse modalità, per rispondere sia ai fabbisogni immediati che alle future espansioni della domanda di idrogeno. Gli impianti tipici includono:

- **Unità di produzione in loco** mediante elettrolizzatori alimentati da energie rinnovabili, come il fotovoltaico, che garantiscono una fornitura sostenibile di idrogeno verde.
- **Sistemi di compressione e stoccaggio** che consentono la gestione dell'idrogeno a pressioni elevate (350-700 bar), essenziali per il rifornimento rapido di veicoli operativi e mezzi di trasporto passeggeri.
- **Distributori integrati** progettati per garantire tempi di rifornimento contenuti, compatibili con le esigenze operative intensive tipiche degli aeroporti.

Le HRS stazionarie richiedono superfici significative per ospitare le infrastrutture principali e le aree di sicurezza, mentre l'integrazione con le reti esistenti, come quelle energetiche o idriche, rappresenta un ulteriore elemento di complessità progettuale.

Oltre alle HRS fisse, le soluzioni di rifornimento compatte e mobili rappresentano un'opzione versatile e rapida da implementare, specialmente in contesti sperimentali o in fase iniziale di adozione della tecnologia a idrogeno.

Queste soluzioni si basano su sistemi containerizzati, che integrano tutti i componenti necessari in unità prefabbricate pronte all'uso.

Le stazioni mobili sono progettate per essere facilmente trasferite e installate in diverse aree operative, senza richiedere significativi interventi civili. Le loro caratteristiche includono:

- **Produzione interna o stoccaggio precaricato**, con capacità tipica di 85-100 kg/giorno di idrogeno.
- **Rifornimento rapido** con tecnologia a 350 e 700 bar, ideale per flotte leggere e mezzi pesanti.
- **Configurazione modulare**, che consente di aggiungere capacità produttiva o di stoccaggio in base alle esigenze crescenti.
- **Ridondanza ridotta**, grazie alla collocazione degli impianti in container singoli o multipli.

L'introduzione delle HRS negli aeroporti non solo consente di decarbonizzare le flotte veicolari, ma prepara le infrastrutture a un futuro in cui l'idrogeno potrebbe alimentare direttamente anche gli aeromobili. Le configurazioni modulari e scalabili delle HRS, insieme all'uso di soluzioni mobili, consentono di ottimizzare i costi iniziali e di accompagnare gradualmente la crescita della domanda di idrogeno nei contesti aeroportuali.

Mobilità Aerea

Per raggiungere le emissioni zero al 2050 come previsto dal Green Deal europeo è necessario ridurre o eliminare le emissioni di gas climalteranti dovute al traffico aereo. Per fare questo è possibile utilizzare carburanti sostenibili, incrementare l'efficienza operativa e dello spazio aereo e adottare sistemi di propulsione innovativi a zero emissioni (principalmente aeromobili a reazione ad idrogeno, aeromobili elettrici a cella a combustibile ed infine aeromobili elettrici a batteria). In questo contesto l'Europa, vantando un importante indotto produttivo, è in grado di apportare un significativo impatto al rinnovamento dei sistemi di produzione aeronautica. Il consorzio AZEA (Alliance for Zero Emissions Aviation) ha sviluppato degli scenari¹² per descrivere la potenziale riduzione di emissioni di CO₂ conseguente all'implementazione di queste tecnologie. Gli scenari analizzati si concentrano sui voli a corto e medio raggio, quelli che collegano le principali città europee. I voli intercontinentali, più lunghi, non sono stati considerati in questa fase.

¹² Flying on electricity and hydrogen in Europe, JUNE 2024, AZEA (Alliance for Zero Emissions Aviation)

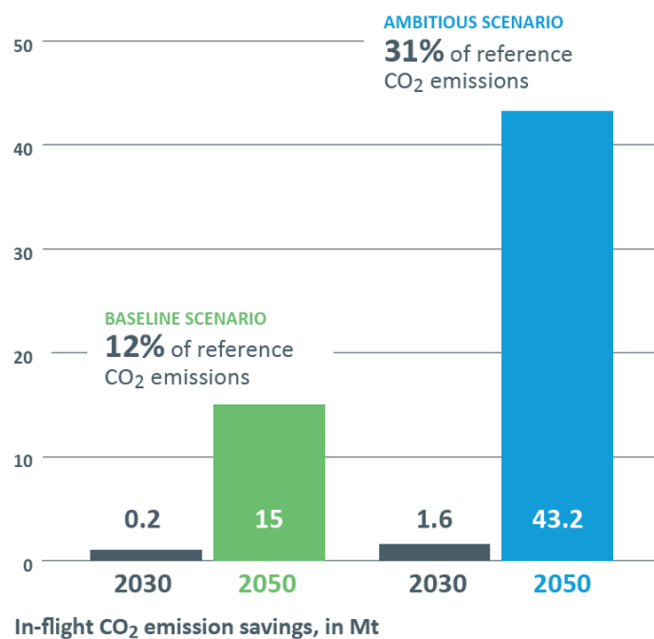


Figura 7 - Potenziale di riduzione delle emissioni di CO₂ in volo quando si introducono aeromobili elettrici (inclusi ibridi elettrici) e a idrogeno nelle flotte europee a corto e medio raggio entro il 2050 (esclusi gli aeromobili widebody)

Lo scenario più conservativo, chiamato “di base”, parte dalle previsioni attuali sulla produzione di nuovi aerei e ipotizza che non ci siano grandi cambiamenti nelle politiche o negli investimenti. In questo caso, si stima che nei prossimi decenni verranno prodotti circa 20.000 nuovi aerei, tra cui modelli tradizionali e a basse emissioni. Lo scenario “ambizioso”, invece, immagina uno sviluppo più rapido delle tecnologie per l'aviazione sostenibile, grazie a maggiori investimenti e a una collaborazione più stretta tra industrie e governi. In questo caso, si prevede una produzione di quasi 40.000 nuovi aerei, con una crescita più forte nei voli regionali e a corto raggio.

Nello scenario di base, le proiezioni del traffico mostrano che, utilizzando combustibili convenzionali, gli aeromobili registrati nell'UE-27 genererebbero circa 125 milioni di tonnellate di emissioni di CO₂ nel 2050 su tutte le rotte a corto e medio raggio. Nello scenario ambizioso, queste emissioni di CO₂ di riferimento aumenterebbero a 142 milioni di tonnellate nel 2050.

Con l'introduzione di aeromobili elettrici e a idrogeno, lo scenario di base stima che le emissioni di riferimento a corto e medio raggio potrebbero diminuire del 12% entro il 2050. Secondo lo scenario ambizioso, si potrebbe arrivare invece ad un risparmio di emissioni fino al 31% entro il 2050. Oltre il 2050, il potenziale di risparmio di CO₂ potrebbe essere ancora maggiore.

Sebbene la ricerca attuale sia diretta agli aeromobili a corto e medio raggio, gli aeromobili a lungo raggio “widebody” rappresentano oltre la metà della quota attuale delle emissioni del trasporto aereo. La valorizzazione dei progressi compiuti sugli aeromobili a corto raggio per estendere la propulsione a idrogeno a questo segmento di mercato offrirebbe una strada per la transizione dell'intera flotta aerea verso emissioni zero.

Premesso ciò emerge come, mentre l'elettrificazione e l'idrogeno oggi guidano la trasformazione della mobilità terrestre negli aeroporti, la sua adozione nei sistemi di propulsione aerea (principalmente in forma liquida)

permette di ridefinire il settore dell'aviazione a lungo termine. Sulla base di vari studi¹³ si identificano diverse alternative, nel pensare a una catena dell'idrogeno per gli *hub* aeroportuali in grado di generarlo, movimentarlo e renderlo disponibile per il rifornimento di veicoli ed eventuali altri utilizzi secondari in loco (Figura 8):

1. **Scenario 1 - Truck-based:** Produzione e liquefazione di H_2 sono collocate fuori dall'area dell'aeroporto (off-site). LH_2 viene movimentato su strada via tankers. Per quanto riguarda lo stoccaggio di LH_2 , questo può essere situato off-site oppure on-site rispetto all'aeroporto.
2. **Scenario 2 - On-site production:** Impianto di produzione e liquefazione H_2 sono situati fuori dall'aeroporto (off-site). Tankers consegnano l' LH_2 allo stoccaggio di LH_2 all'interno dell'aeroporto (on-site). La consegna LH_2 agli aeromobili può avvenire anch'essa tramite tankers oppure tramite rete di distribuzione criogenica e sistema di idranti.
3. **Scenario 3 - Pipeline-based:** Solo l'impianto di produzione di H_2 (GH_2) è situato al di fuori dall'aeroporto (off-site). L'idrogeno viene consegnato all'aeroporto in forma gassosa tramite condotta. All'interno dell'aeroporto avranno luogo gli ultimi step della catena: liquefazione, stoccaggio LH_2 e consegna agli aeromobili - tramite tankers oppure tramite rete di distribuzione criogenica e sistema di idranti.

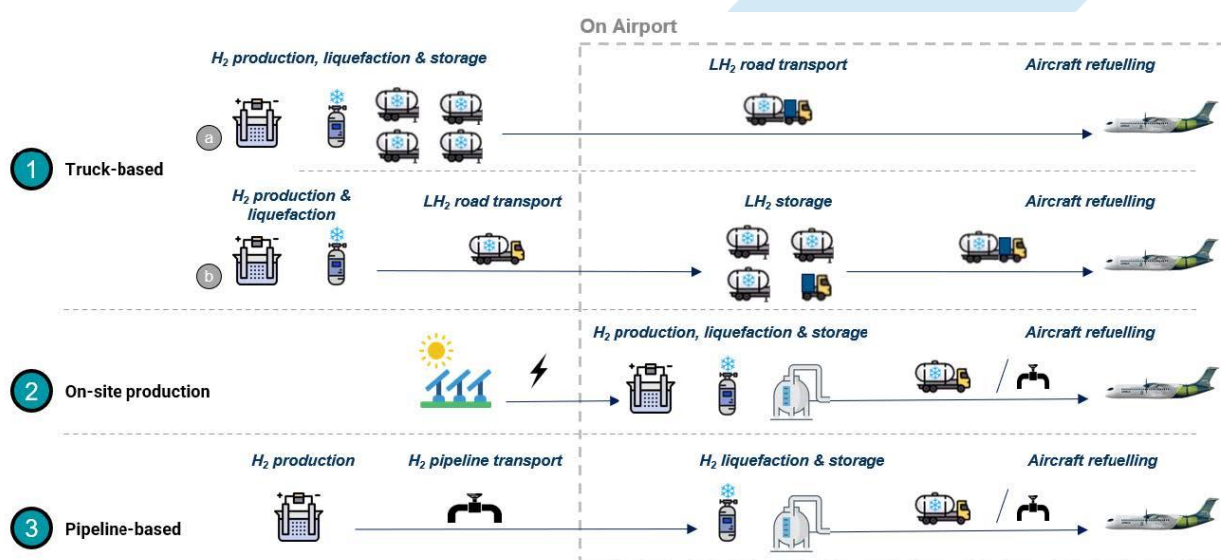


Figura 8 - Possibili configurazioni di supply chain per l'idrogeno liquido nel settore Aviation Scenari di approvvigionamento idrogeno liquido

Per abilitare la catena logistica di rifornimento dei futuri aeromobili si ritengono percorribili, ad oggi, i seguenti step:

¹³ Fonte SEA Aeroporti Milano

- a) **Produzione:** In ottica di decarbonizzazione, si assume di far riferimento a H_2 verde prodotto tramite elettrolisi (attraverso le tecnologie esposte nel paragrafo 3.1).
- b) **Liquefazione:** Il processo generale di liquefazione è suddiviso in diverse fasi di raffreddamento, compressione ed espansione per raggiungere il punto di ebollizione dell' H_2 a circa 20 K. Due soluzioni, in particolare, vengono utilizzate per la liquefazione dell'idrogeno in applicazioni industriali su larga scala: il processo di tipo *Claude* e i *cicli Brayton ad elio*. Sebbene i costi di investimento per il Claude superino quelli del Brayton, il primo fornisce un'efficienza di processo significativamente più elevata, che si traduce in costi operativi inferiori. Poiché le scale di domanda per l'uso aeronautico sono piuttosto ampie e trarrebbero vantaggio da costi operativi inferiori, risulta ragionevole aspettarsi una predominanza futura del processo Claude in questo settore.
- c) **Stoccaggio:** Lo stoccaggio di LH_2 è necessario per garantire la continuità della fornitura, rendendo il funzionamento della catena di approvvigionamento più flessibile e costante, poiché lo stoccaggio viene utilizzato per bilanciare le fluttuazioni temporali nei profili di input e output di LH_2 . Lo stoccaggio va a garantire una fornitura di carburante per diversi giorni anche in assenza (minimo 2-3 giorni di continuità, anche in base a considerazioni di valutazione di rischio sulla fuel disruption). Una forma sferica (tecnologia delle cosiddette *sfere di Horton*) o cilindrica assicura un rapporto superficie-volume ottimizzato quindi un ridotto apporto di calore dall'esterno, mentre doppie pareti isolate sottovuoto impediscono il trasferimento di calore per convezione. Si tenga presente, tuttavia, che le perdite di H_2 non possono essere completamente prevenute a causa della conversione spontanea delle due forme isomeriche di H_2 (orto/para). L' H_2 vaporizzato risultante deve essere sfiato dal serbatoio di stoccaggio per evitare sovrappressioni (*boil off*), comportando quindi perdite giornaliere di quantitativo stoccato. Esse, però, nel caso di grandi impianti di stoccaggio, sono relativamente basse; inoltre, assumendo flussi relativamente costanti di LH_2 in contesto aeroportuale, dati i regimi di operatività degli aeromobili, si presumono tempi di permanenza in serbatoio ridotti per l' LH_2 stoccato, il che limita ulteriormente le perdite. Questi due aspetti sono tali da non giustificare, pertanto, i costi associati a eventuali sistemi di raffreddamento attivi destinati alla liquefazione dell' H_2 gassoso ventato.
- d) **Trasporto e Rifornimento:** Le soluzioni tecnologiche per questi scopi saranno oggetto delle successive sezioni del presente capitolo.

Hydrogen Refueling Stations (HRS) per aeromobili

Nella presente sezione viene fornita una panoramica delle diverse modalità di rifornimento ad oggi ipotizzabili per gli aeromobili, basate su primi prototipi ed ipotesi di sviluppo a livello industriale.

Modalità 1: Refueling Trucks con Manichetta diretta all'aeromobile

Come riportato nella Figura 9, la prima modalità prevede l'impiego di autocisterne LH_2 (refueling trucks).

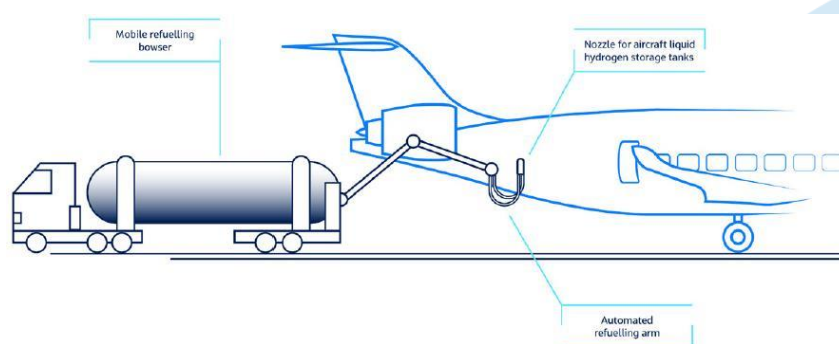


Figura 9 - Refueling Trucks con Manichetta diretta all'aeromobile ¹⁴

Ognuno di questi veicoli è costituito dai seguenti componenti:

- la motrice;
- un serbatoio criogenico LH₂ isolato montato su un rimorchio (trailer);
- un'unità di distribuzione (dispenser) integrata nel camion, con la presenza di una manichetta collegabile direttamente al velivolo;
- una piccola unità di spurgo, con serbatoio di gas inerte (elio) per "lavare" i tubi di rifornimento di LH₂ da altri gas prima del rifornimento con LH₂ criogenico.

Il rifornimento di idrogeno liquido tramite autocisterne offre una soluzione flessibile e a basso costo iniziale, ma presenta alcune limitazioni in termini di capacità e potenziale impatto sul traffico aeroportuale. La scelta di questa modalità di rifornimento deve essere valutata attentamente in base alle specifiche esigenze di ciascun aeroporto.

Caratteristiche delle autocisterne per idrogeno liquido (LH₂):

- **Serbatoi:** Costruttivamente simili a quelli stazionari, con capacità utile di circa 3,5-4 tonnellate di LH₂.

¹⁴ Fonte AIRBUS

- **Ullage:** Una piccola parte del serbatoio (circa il 4%) è riempita di gas per mantenere la temperatura criogenica dell'idrogeno liquido.
- **Rifornimento autocisterna:** Le autocisterne vengono riempite presso una centrale di carburante e poi si spostano verso l'aeromobile.
- **Elio:** Viene utilizzato come gas di spurgo per eliminare l'ossigeno e prevenire la formazione di ghiaccio durante il rifornimento.

Vantaggi del rifornimento tramite autocisterna:

- **Flessibilità:** Il numero di autocisterne può essere adattato alla domanda.
- **Basso investimento iniziale:** Il costo di un singolo autocarro è relativamente contenuto.

Svantaggi del rifornimento tramite autocisterna:

- **Congestione:** Aumenta il traffico nei piazzali aeroportuali.
- **Capacità limitata:** Ogni autocisterna può trasportare una quantità limitata di idrogeno.
- **Spazio limitato:** Non sempre è disponibile sufficiente spazio per una flotta numerosa di autocisterne negli aeroporti.

Modalità 2: Piping interrato

La seconda configurazione di rifornimento di LH₂ utilizza un sistema di condotte criogeniche con idranti per il rifornimento alle piazzole di sosta, analogo ai sistemi esistenti di condotte e idranti del cherosene. All'interno del sistema di condotte, LH₂ è costantemente disponibile, il che consente maggiori portate di LH₂ sulle piazzole dell'aeroporto. Per collegare la condotta LH₂ all'aereo, vengono utilizzati camion con unità di distribuzione mobili (*mobile dispensing units*).

Per il rifornimento, un camion di distribuzione viene azionato tra le piazzole degli aeromobili per collegare l'idrante e il serbatoio dell'aeromobile LH₂.

Esistono due tipi di pipeline che possono essere utilizzate per distribuire l'idrogeno liquido dai serbatoi di stoccaggio alle postazioni di rifornimento: *vacuum jacket* (tubi a camicia sottovuoto) e *solid insulation pipe* (tubi con isolamento solido). La soluzione più comune è la prima, rappresentata in Figura 10, e richiederebbe una condotta sotto la superficie delle vie di rullaggio e dei piazzali dell'aeroporto, accessibili ad ogni stand di sosta degli aeromobili. Si prevede che la condotta debba essere sufficientemente grande da consentire l'ispezione visiva del tubo ed eventuali operazioni di manutenzione. Inoltre, la parte superiore della condotta dovrebbe essere aperta per impedire la possibilità di accumulo di gas in caso di perdite di idrogeno.

Un *circuito di alimentazione LH₂ primario*, un *circuito di riserva per ridondanza* (affidabilità dell'alimentazione) e un *circuito di raccolta del GH₂ di boil-off* sono installati insieme in un fascio di condotte. La condotta ha un design circolare per garantire un flusso di LH₂ costante e prevede un ingresso e un'uscita dal serbatoio di stoccaggio generale. La linea di boil-off potrebbe anche essere integrata all'interno di uno strato esterno del tubo, contribuendo a ridurre al minimo la perdita di calore dalla sezione (centrale) percorsa dall'idrogeno liquido. L'idrogeno gassoso può essere ri-liquefatto per l'uso su aeromobili o per altre applicazioni, come la combustione diretta per le caldaie degli edifici aeroportuali o per alimentare le celle a combustibile dedicate alle apparecchiature di supporto a terra.

Il rifornimento di idrogeno liquido tramite condotte e idranti offre diversi vantaggi rispetto all'utilizzo di autocisterne:

- **Maggiore sicurezza:** Riduce i rischi legati al trasporto su strada e alla manipolazione manuale dei tubi di rifornimento.
- **Maggiore rapidità:** Permette di rifornire gli aeromobili in tempi più brevi.

Tuttavia, questa soluzione presenta anche degli svantaggi:

- **Costi iniziali elevati:** L'installazione di un sistema di condotte richiede un investimento iniziale significativo.
- **Minor flessibilità:** Una volta installato, il sistema è meno flessibile rispetto a una flotta di autocisterne, che può essere facilmente aumentata o diminuita in base alle esigenze.
- **Impatto sulle infrastrutture:** L'impianto ha una vita utile molto lunga; quindi, la scelta di questa tecnologia ha un notevole impatto sul layout aeroportuale.

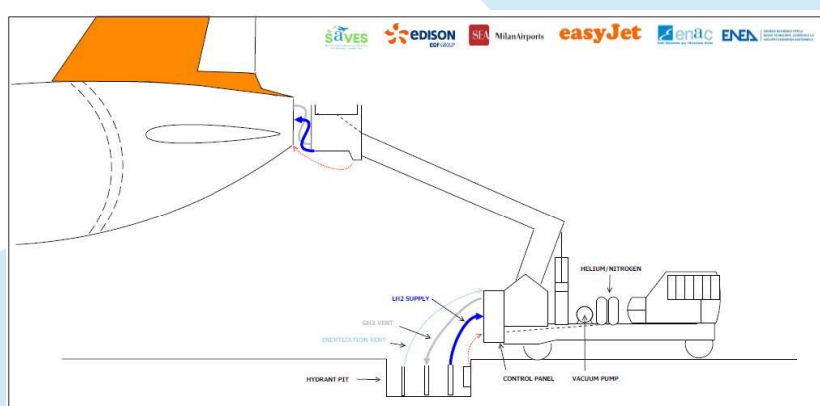
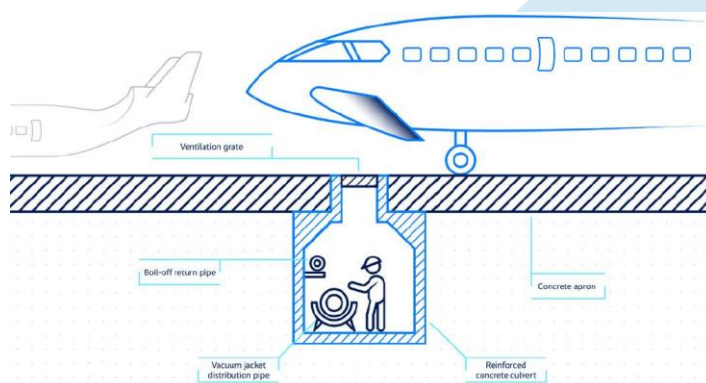
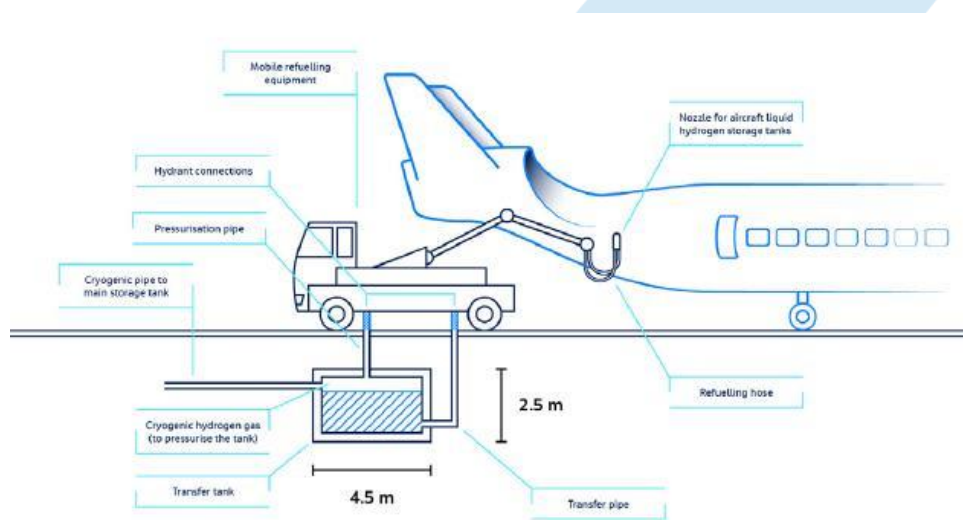


Figura 10 - Rifornimento con piping interrato

Considerazioni per il rifornimento

a) Mantenimento del differenziale di pressione

Per movimentare il flusso di LH_2 nel tubo sarà necessario realizzare un differenziale di pressione tra il serbatoio di stoccaggio e il serbatoio di ricezione. Per creare questo differenziale, è possibile sfruttare le proprietà di espansione dell'idrogeno criogenico. Il rapporto di volume tra idrogeno liquido e idrogeno gassoso a temperatura ambiente è 1:845. Pertanto, per creare pressione nel serbatoio di stoccaggio, una quantità di idrogeno liquido viene rimossa dal serbatoio di stoccaggio e lasciata vaporizzare. Viene quindi reintrodotta nel serbatoio in modo che, riscaldandosi gradualmente, si espanda e applichi pressione all'idrogeno liquido. Una volta raggiunta la pressione richiesta, la valvola di uscita sul serbatoio viene aperta e l'idrogeno fluisce verso il serbatoio di destinazione. Nel caso degli aeroporti, criticità nel mantenimento della pressione possono sorgere dalla distanza tra stand aeromobili e serbatoio di stoccaggio, nonché dal fatto che ci saranno più aeromobili riforniti contemporaneamente. Una possibile soluzione per mantenere regolare la pressione richiesta per il rifornimento dei serbatoi dell'aeromobile potrebbe consistere in serbatoi di trasferimento (*transfer tanks*) situati in ogni piazzola. Il serbatoio di trasferimento sarebbe dimensionato in modo da corrispondere alla dimensione massima del serbatoio di carburante dell'aeromobile che utilizza la piazzola. I serbatoi di trasferimento potrebbero essere fattibilmente posizionati sotto o sopra il terreno – come riportato nella Figura 11.



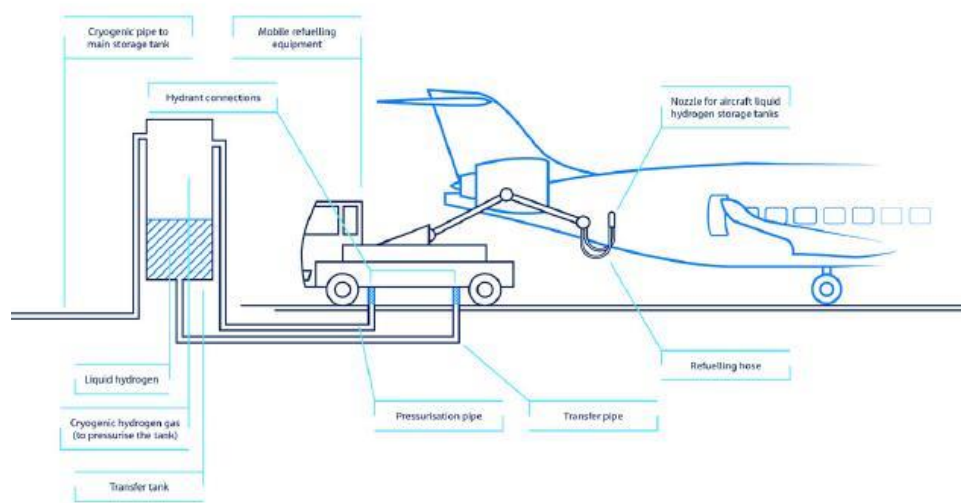


Figura 11- Posizionamento dei serbatoi di trasferimento sotto il terreno (alto) o sopra il terreno (basso)

Per quanto riguarda il tema del mantenimento della pressione nel sistema, è rilevante menzionare anche il possibile impiego di pompe criogeniche (cd. criopompe) per generare il flusso di LH₂. Sono disponibili diversi tipi di criopompe, ma la maggior parte non ha ancora raggiunto la maturità commerciale per applicazioni su larga scala. Nel caso di ricorso a criopompe, è ragionevole supporre l'esistenza di due sistemi di pompaggio: il primo sistema viene utilizzato per riempire i refueling tanks di LH₂ presso lo stoccaggio centrale di LH₂ oppure per creare il flusso di massa richiesto per alimentare le condotte LH₂, a seconda dell'opzione scelta; il secondo sistema è necessario per i flussi di carburante durante il rifornimento dell'aereo. In questa configurazione, i camion hanno una criopompa aggiuntiva a bordo, mentre il sistema di tubazioni e idrante LH₂ include un'unità di distribuzione mobile (camion con a bordo sistema di criopompa).

b) Tempi di turnaround rapidi

Per garantire operazioni commercialmente efficienti, sia per l'aeroporto che per le compagnie aeree, è importante mantenere tempi di turnaround rapidi. Turnaround più lenti comportano che gli aeromobili rimangano in stand per più tempo, riducendo il tempo di volo disponibile e penalizzando la capacità di parcheggio del piazzale dell'aeroporto. In molti aeroporti la capacità è limitata e per la maggior parte delle compagnie aeree gli orari dei voli sono già ottimizzati, lasciando poco spazio per consentire tempi di sosta prolungati. L'introduzione del rifornimento con idrogeno liquido probabilmente comporterà la gestione dei tempi di turnaround aumentati, requisiti di distanza di sicurezza più ampi e la necessità di nuove tecnologie. I tempi di turnaround vengono in genere calcolati da quando un aeromobile arriva in stand ed è sui blocchi a quando l'aeromobile si allontana dallo stand ed è fuori dai blocchi.

Il Gantt seguente mostra un esempio di sequenza delle operazioni necessarie e delle loro durate di riferimento nel caso di LH₂ fornito con Refueling Trucks con Manichetta diretta all'aeromobile, con lo scopo di permettere una valutazione di compatibilità con le operazioni aeroportuali.

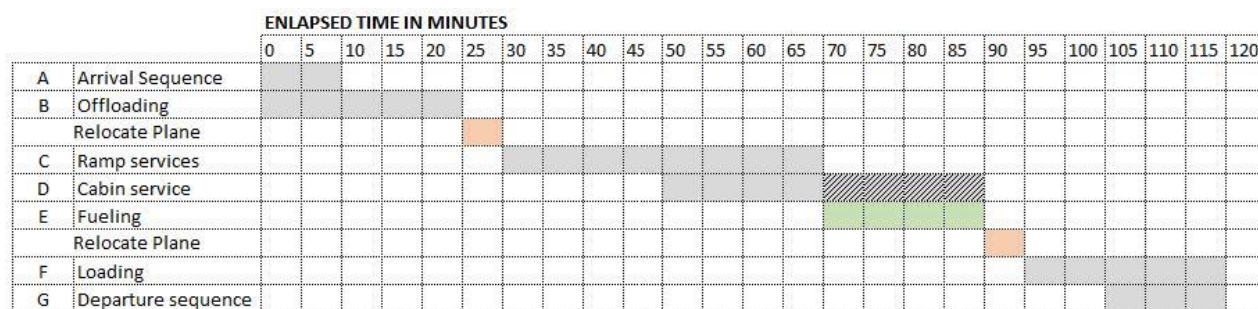


Figura 12 - sequenza delle operazioni e relative tempistiche in minuti ¹⁵

In forma liquida, l'idrogeno ha una densità inferiore al cherosene. Di conseguenza il rifornimento con idrogeno liquido richiederebbe più tempo rispetto al cherosene, a parità di diametro del tubo e di portata. Ciò evidenzia la necessità di tubi di diametro maggiore ed eventualmente l'impiego di più tubi di rifornimento utilizzati contemporaneamente per consentire un tempo di rifornimento più rapido.

¹⁵ Fonte: progetti SAVES

4 L'introduzione dell'idrogeno in ambito aeroportuale

Il presente capitolo propone una guida metodologica per favorire l'introduzione dell'idrogeno negli aeroporti (Figura 13).

A partire dalla classificazione degli aeroporti, in termini di traffico, vengono definite strategie personalizzate basate sulla dimensione dell'aeroporto e sul tipo di utenti, con proiezioni di breve, medio e lungo periodo. Si analizzano inoltre le modalità di stima del fabbisogno (con un focus particolare sulla mappatura dei veicoli), valutazione della potenziale produzione/approvvisionamento di H_2 e di calcolo delle emissioni di CO_2 evitabili. Infine, si dovranno considerare gli aspetti realizzativi, inclusi la selezione ottimale dei siti e la progettazione delle infrastrutture necessarie.

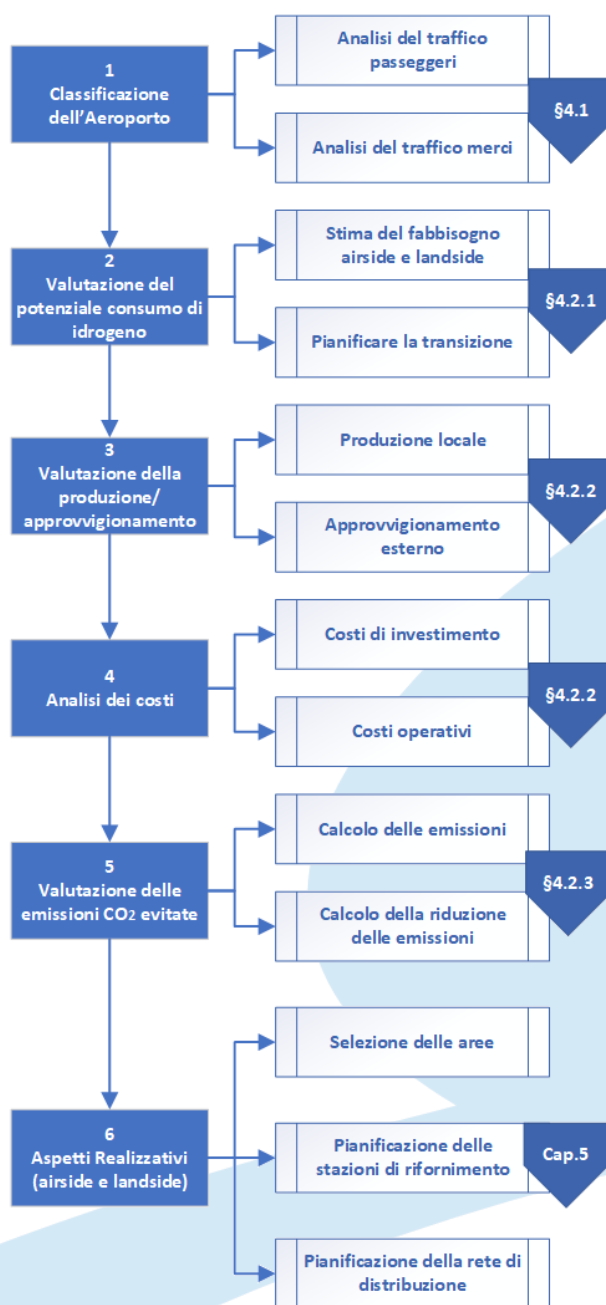


Figura 13 - Le 6 fasi per l'introduzione dell'idrogeno in ambito aeroportuale

4.1 Tipologie di aeroporto e possibili usi finali

La transizione verso l'idrogeno nel settore aeroportuale richiede una valutazione attenta delle infrastrutture e dei processi esistenti. La valutazione del potenziale consumo di idrogeno non può prescindere da una classificazione degli aeroporti italiani in base al volume di traffico passeggeri e merci, né dalla collocazione geografica e dal potenziale ruolo che l'aeroporto può svolgere nei confronti dei territori circostanti.

È evidente che un aeroporto con un "numero elevato di movimenti aerei", traducibile sia in termini di passeggeri che di merci, avrà un fabbisogno di idrogeno proporzionalmente maggiore. Questa correlazione diretta è legata alla

necessità di alimentare i vari equipaggiamenti aeroportuali, dai mezzi di assistenza a terra agli aeromobili stessi. Questo principio guida l'analisi successiva, che esplora le specificità di ciascuna categoria di aeroporto e le implicazioni per l'implementazione delle tecnologie a idrogeno.

I grandi aeroporti destinati al traffico commerciale richiederanno al contempo investimenti significativi per adeguare le infrastrutture ed implementare sistemi di produzione e distribuzione dell'idrogeno su larga scala. L'utilizzo iniziale dell'idrogeno sarà focalizzato su applicazioni *ground*, quali le attrezzature di supporto a terra (GSE - *Ground Support Equipment*), i trattori per il traino degli aeromobili, i carrelli elevatori ed i veicoli per il trasporto merci all'interno dell'eventuale area cargo, anche al fine di ridurre le emissioni locali di CO₂ e migliorare la qualità dell'aria. Inoltre, si potranno valutare progetti pilota per l'alimentazione a idrogeno di “*heavy vehicles*” per il trasporto intermodale, come camion e treni, al fine di creare una filiera logistica completamente decarbonizzata.

La capillare rete di aeroporti regionali può invece diventare un fulcro strategico per la diffusione dell'idrogeno a livello nazionale. Non solo questi scali contribuirebbero alla decarbonizzazione del settore aereo, ma si potrebbero trasformare in veri e propri hub energetici a servizio di industrie e trasporti locali, andando a generare al contempo nuove opportunità per lo sviluppo economico del territorio. In prospettiva, questi scali potranno offrire una soluzione più sostenibile e competitiva per il trasporto di merci su brevi e medie distanze. Il network di aeroporti regionali sul territorio potrebbe configurarsi come una infrastruttura strategica per la diffusione dell'idrogeno, soddisfacendo la crescente domanda di questo vettore energetico pulito e stimolando la transizione energetica a livello locale.

Altro aspetto da considerare è, inoltre, che gli aeroporti con traffico limitato e strutture meno energivore, offrono un terreno fertile per sperimentare soluzioni innovative e sostenibili, come ad esempio l'utilizzo di elettrolizzatori compatti per produrre idrogeno in loco. Questa flessibilità permetterebbe un'introduzione graduale e mirata di tale vettore energetico, adattandosi alle specifiche esigenze di ciascun aeroporto e di potenziali utenti locali.

La classificazione proposta in questo capitolo rappresenta un punto di partenza fondamentale per la pianificazione strategica dell'implementazione dell'idrogeno sul territorio. Grazie ad essa, sarà possibile definire strategie di implementazione personalizzate e mirate, ottimizzando al contempo gli investimenti e stimando i costi per ogni tipologia di aeroporto.

Gli aeroporti nazionali possono essere classificati in base a diversi criteri, tra cui dimensioni, traffico e tipologia di operazioni. La classificazione da utilizzare per lo scopo del presente documento riguarda il traffico aereo civile, in cui si esula il traffico effettuato per ragioni di Stato (traffico militare, dogana, polizia, altri voli per leggi dello Stato). Perseguendo la categorizzazione degli aeroporti in base al volume di traffico passeggeri, si può definire¹⁶:

- **Categoria A**, cosiddetta dei “grandi aeroporti comunitari” con traffico superiore a 10 milioni di passeggeri annui;
- **Categoria B**, cosiddetta degli “aeroporti nazionali” con traffico compreso tra 5 e 10 milioni di passeggeri annui;
- **Categoria C**, cosiddetta dei “grandi aeroporti regionali” con traffico compreso tra 1 e 5 milioni di passeggeri annui;
- **Categoria D**, cosiddetta dei “piccoli aeroporti regionali” con traffico inferiore a 1 milione di passeggeri annui;

¹⁶ ATLANTE DEGLI AEROPORTI ITALIANI Enac e Ministero delle Infrastrutture e dei trasporti Edizione 1 - settembre 2010

- **Categoria E**, dei piccoli aeroporti locali, con meno 250.000 passeggeri.

In relazione alla classificazione degli aeroporti, è fondamentale considerare le specifiche esigenze di ciascuna categoria:

- **Grandi aeroporti (categorie A e B):** Questi scali, caratterizzati da un elevato volume di traffico, richiederanno investimenti più consistenti per adeguare le infrastrutture e implementare sistemi di produzione e distribuzione dell'idrogeno su larga scala.

I primi mezzi utilizzabili ad idrogeno in queste tipologie di aeroporti sono le attrezzature di supporto a terra aeroportuale (Ground Support Equipment) quali mezzi per la movimentazione merci, muletti, trattori aerei, etc. L'implementazione dell'idrogeno su aerei dedicati a tratte a lungo raggio è prevista non prima del 2050.

- **Aeroporti regionali (categorie C e D):** Per questi aeroporti, l'implementazione dell'idrogeno potrebbe richiedere soluzioni più flessibili e modulari, adattate alle dimensioni e alle esigenze specifiche di ciascun scalo.

In prospettiva, al 2035, i primi aeromobili ad idrogeno potrebbero essere introdotti ed utilizzati negli aeroporti regionali, ideali anche per l'operatività di velivoli di dimensioni ridotte e a basso impatto ambientale. La soluzione permetterebbe di offrire maggiore flessibilità di collegamento anche nelle destinazioni oggi non servite dal trasporto aereo, riduzioni di emissioni e rumorosità, ed economicità rispetto ai velivoli di linea. Inoltre, la capillare rete di aeroporti regionali può diventare un fulcro strategico per la diffusione dell'idrogeno. Non solo questi scali contribuirebbero alla decarbonizzazione del settore aereo, ma si trasformerebbero in veri e propri hub energetici, fornendo idrogeno a industrie e trasporti locali. Ciò genererebbe nuove opportunità economiche e accelererebbe la transizione energetica in tutto il territorio italiano.

- **Piccoli aeroporti locali (categoria E):** Oltre ad alcuni punti in comune con gli aeroporti regionali, l'introduzione dell'idrogeno in piccoli aeroporti potrebbe essere più graduale e focalizzata su specifici usi, come l'alimentazione di veicoli elettrici a celle a combustibile utilizzati per servizi aeroportuali.

Parallelamente all'analisi del traffico passeggeri va anche analizzato il traffico merci. Il trasporto aereo merci contribuisce infatti in modo non trascurabile alle emissioni di CO₂ a livello globale. Considerando l'elevata intensità carbonica di questo tipo di trasporto, è fondamentale introdurre una classificazione dettagliata che consenta di quantificare le tonnellate di merci trasportate via aerea. La classificazione di seguito proposta ha lo scopo di essere uno strumento essenziale per monitorare l'evoluzione delle emissioni, valutare l'efficacia delle misure di mitigazione e definire obiettivi di riduzione più ambiziosi.

Perseguendo la categorizzazione degli aeroporti italiani in base al volume di traffico merci, si può definire:

- **Categoria A: Grandi hub cargo internazionali** - Aeroporti con un volume di merci superiore a 100.000 tonnellate annue. Questi sono generalmente hub importanti per il traffico aereo cargo a livello internazionale.
- **Categoria B: Grandi hub cargo nazionali** - Aeroporti con un volume di merci compreso tra 50.000 e 100.000 tonnellate annue. Questi aeroporti svolgono un ruolo chiave nel trasporto merci a livello nazionale e spesso servono come hub regionali.
- **Categoria C: Aeroporti con attività cargo significativa** - Aeroporti con un volume di merci compreso tra 10.000 e 50.000 tonnellate annue. Questi aeroporti hanno un'attività cargo rilevante, ma su scala più contenuta rispetto ai precedenti.

- **Categoria D: Aeroporti con attività cargo limitata** - Aeroporti con un volume di merci compreso tra 1.000 e 10 .000 tonnellate annue. Questi aeroporti hanno un'attività cargo marginale.
- **Categoria E: Aeroporti con attività cargo molto limitata o assente** - Aeroporti con un volume di merci inferiore a 1.000 tonnellate annue. Questi aeroporti hanno un'attività cargo quasi inesistente o si concentrano su altri tipi di traffico (passeggeri, aviazione generale).

In relazione alla classificazione degli aeroporti in base al volume di traffico merci, è fondamentale considerare le specifiche esigenze di ciascuna categoria per una transizione efficiente verso l'idrogeno come vettore energetico nel settore cargo:

- **Categorie A e B (Grandi hub cargo):** Questi scali, caratterizzati da un elevato volume di traffico merci e da una logistica complessa, necessitano di investimenti significativi per l'adeguamento delle infrastrutture e l'implementazione di sistemi di produzione e distribuzione dell'idrogeno su larga scala. L'utilizzo iniziale dell'idrogeno sarà focalizzato sulle attrezzature di supporto a terra aeroportuale (GSE - Ground Support Equipment), come i trattori per aerei, i carrelli elevatori e i veicoli per il trasporto merci all'interno dell'eventuale area cargo, al fine di ridurre le emissioni locali di CO₂ e migliorare la qualità dell'aria. Inoltre, si potranno valutare progetti pilota per l'alimentazione a idrogeno di mezzi pesanti per il trasporto intermodale, come camion e treni, al fine di creare una filiera logistica completamente decarbonizzata. In prospettiva al 2050 l'idrogeno potrà anche essere utilizzato per rifornire voli aerei cargo di lungo raggio
- **Categorie C e D (Aeroporti con attività cargo significativa e limitata):** Per questi aeroporti, l'implementazione dell'idrogeno potrà avvenire in modo più graduale, concentrandosi inizialmente su soluzioni modulari e scalabili. In prospettiva questi scali potranno offrire una soluzione più sostenibile e competitiva per il trasporto di merci su brevi e medie distanze. La capillare rete di aeroporti regionali sul territorio potrebbe trasformarsi in una infrastruttura strategica per la diffusione dell'idrogeno, soddisfacendo la crescente domanda di questo vettore energetico e stimolando la transizione energetica a livello locale. Questa integrazione consentirebbe di estendere l'utilizzo dell'idrogeno lungo tutta la catena di approvvigionamento, dal produttore al consumatore finale, ottimizzando i processi logistici e riducendo significativamente l'impatto ambientale del trasporto merci. In prospettiva al 2035 l'idrogeno potrà anche essere utilizzato per rifornire voli aerei cargo di corto raggio
- **Categoria E (Piccoli aeroporti locali):** Questi aeroporti potranno beneficiare di soluzioni più semplici e meno costose, come l'utilizzo di piccoli elettrolizzatori per produrre idrogeno direttamente in loco, da utilizzare per alimentare i GSE e altri piccoli veicoli elettrici.

Infine, un aspetto rilevante sullo sviluppo della filiera in aeroporto sarà quello di identificare la posizione dell'aeroporto rispetto alle reti nazionali di distribuzione, quali ad esempio i Corridoi di cui si è trattato al precedente paragrafo 3.1.

4.2 Definizione delle specifiche tecniche dei progetti idrogeno

Dopo la valutazione della tipologia di aeroporto si procede alla definizione delle specifiche tecniche di sistemi di produzione e/o approvvigionamento ed utilizzo di idrogeno in ambito aeroportuale. In questa sezione si analizzano principalmente campi di utilizzo che sono già ad un livello di maturità tecnologica elevato e quindi si escludono gli utilizzi diretti per la propulsione avionica. I possibili utilizzi dell'idrogeno a terra sono per sistemi stazionari o per sistemi di mobilità. L'uso in sistemi stazionari presenta diverse alternative ad emissioni di anidride carbonica basse o nulle e per questo l'implementazione di sistemi ad idrogeno risulta molto dipendente dalla specifica applicazione ed in generale non sempre vantaggiosa. Per quanto riguarda la mobilità invece i sistemi ad idrogeno hanno dei

vantaggi tecnici rispetto ad i mezzi elettrici con batteria. Per i mezzi pesanti, o che richiedono notevole autonomia, la densità energetica dell'idrogeno (maggiore rispetto a quella delle batterie) presenta un vantaggio oggettivo. Oltre alla stima della domanda verrà di seguito riportata una metodologia per la valutazione della produzione e/o approvvigionamento per il soddisfacimento della stessa, si concluderà poi la trattazione del paragrafo con informazioni su elementi per una corretta stima delle emissioni di CO₂.

4.2.1 Stima della domanda

Per la stima dei possibili consumi di idrogeno dedicati alla mobilità, è necessario partire da una mappatura dei veicoli attualmente presenti per poi delineare possibili piani di sostituzione.

La mappatura dei veicoli è un processo essenziale per una gestione efficace della flotta e per creare un modello decisionale replicabile per la valutazione delle sostituzioni, in particolare in un ambiente complesso come quello aeroportuale. In questo contesto, è fondamentale considerare sia l'area airside, dedicata alle operazioni legate agli aeromobili, sia l'area landside, che include le zone accessibili al pubblico, come i terminal, i parcheggi e le vie di accesso. È inoltre preferibile considerare i mezzi di diretto controllo del gestore aeroportuale ma anche quelli di aziende terze operanti in aeroporto.

In airside, la mappatura comprende i veicoli che sono coinvolti in operazioni a stretto contatto con gli aeromobili, dove sicurezza e affidabilità sono prioritarie. Tra i principali:

- Mezzi per il rifornimento degli aeromobili.
- Veicoli per la manutenzione e il supporto tecnico, come carrelli elevatori e trattori/nastri per il trasporto di bagagli.
- Mezzi per la movimentazione degli aeromobili, come trattori per il pushback e per lo spostamento degli aerei.
- Veicoli coinvolti nelle ordinarie operazioni aeroportuali, per lo spostamento sulle piazzole e per il trasferimento del personale sul piazzale.
- Veicoli di servizio e manutenzione, utilizzati per la pulizia e la manutenzione delle infrastrutture aeroportuali, ispezioni pista e raccordi.

La mappatura di questi veicoli richiede un'analisi dettagliata delle loro caratteristiche tecniche e operative, come età, chilometraggio, frequenza d'uso e tipo di alimentazione. Questa analisi diventa particolarmente utile nel pianificare il passaggio verso una flotta a zero emissioni, composta da veicoli elettrici o alimentati a idrogeno.

In landside, la mappatura riguarda invece i veicoli che operano nelle aree pubbliche dell'aeroporto, come i terminal passeggeri e le zone di carico e scarico. In questo contesto, si considerano:

- Veicoli per il trasporto passeggeri, come shuttle bus, taxi e mezzi pubblici.
- Mezzi per la logistica, che includono furgoni per le consegne e per il trasporto bagagli.
- Veicoli di servizio e manutenzione, utilizzati per la pulizia e la manutenzione delle infrastrutture aeroportuali.
- Flotta del gestore aeroportuale utilizzata per gli spostamenti del personale aziendale.

Oltre a consentire il monitoraggio dell'efficienza operativa della flotta, la mappatura consente di individuare in maniera robusta tutti i mezzi dove poter conseguire una riduzione dell'impatto ambientale, favorendo l'adozione di soluzioni innovative che possano migliorare l'efficienza e la sostenibilità delle operazioni aeroportuali. Infatti, identificando i veicoli obsoleti o altamente inquinanti, è possibile pianificare una graduale transizione verso mezzi

a emissioni zero, come veicoli elettrici o alimentati a idrogeno, contribuendo a una significativa riduzione delle emissioni di CO₂ nell'area aeroportuale.

La mappatura può essere redatta analizzando, in prima battuta, i seguenti parametri:

- **Tipologia:** I veicoli vengono suddivisi in diverse categorie, come automobili, furgoni, autobus, mezzi pesanti e altro. Questa distinzione consente di analizzare le diverse esigenze operative legate a ciascun tipo di veicolo.
- **Alimentazione:** I veicoli sono classificati in base al tipo di carburante utilizzato, che può essere diesel, benzina o elettrico. Questa classificazione è cruciale per valutare le opzioni di sostenibilità e le potenzialità di riduzione delle emissioni.
- **Consumo energetico:** espresso in litri di carburante annui o kWh annui (se elettrico)
- **Utilizzo annuo:** espresso in chilometri annui o ore di utilizzo annue
- **Area di utilizzo:** Si distingue tra veicoli impiegati nelle zone airside e landside. Questa distinzione permette di analizzare le operazioni in contesti operativi diversi e di comprendere come le esigenze variano a seconda della posizione.
- **Maturità del veicolo / Anno di immatricolazione:** Questo parametro indica l'età del veicolo, fornendo informazioni preziose sul livello di tecnologia impiegata e sull'efficienza operativa. Veicoli più recenti tendono ad avere migliori prestazioni e minori emissioni.
- **Disponibilità temporale sul mercato di un veicolo simile a idrogeno:** Si esamina la presenza di modelli di veicoli a idrogeno sul mercato, utile per valutare le potenziali sostituzioni o retrofitting. Questa analisi è fondamentale per pianificare una transizione efficace verso soluzioni a basse emissioni.
- **Tempi di ricarica attuali (se elettrici):** Si determina il tempo necessario per ricaricare completamente un veicolo elettrico. Questa informazione è cruciale per pianificare le operazioni e ottimizzare l'uso dei veicoli.
- **Grado di ridondanza:** Viene valutata la capacità della flotta di mantenere operazioni continue, considerando le esigenze operative legate ai tempi di ricarica. Un grado elevato di ridondanza è fondamentale per garantire la continuità delle operazioni aeroportuali.

Basandosi sui dati raccolti nella mappatura, è possibile stimare la sostituibilità o il retrofitting dei veicoli. Questa pianificazione considera scenari con proiezioni che si estendono dai prossimi cinque anni fino anche ai prossimi quindici anni. In questo contesto, gli obiettivi includono:

- riduzione delle emissioni: valutazione di come la sostituzione dei veicoli possa contribuire a migliorare la sostenibilità ambientale dell'aeroporto;
- adattamento tecnologico: considerazione dell'introduzione di tecnologie innovative come i veicoli elettrici o a idrogeno (H₂).

Per valutare i possibili consumi di idrogeno è necessario stimare dei fattori di consumo. Un approccio basilare ma efficace consiste nel fissare una stima di consumo per ogni classe di veicolo, come riportato in Tabella 3.

Tabella 3 - - Dati medi di consumo per classe di veicolo espressi in kg di Idrogeno ogni 100km

Categoria	Consumi	Unità di misura
Automobile	1	kg H ₂ /100 km
Minivan	1.5	kg H ₂ /100 km
Furgone	2	kg H ₂ /100 km

Autobus	8	kg H ₂ /100 km
Trattore	10	kg H ₂ /100 km
Carrello elevatore	0.6	kg H ₂ /gg

Per una pianificazione efficace della transizione energetica della flotta, è poi fondamentale identificare una serie di indicatori chiave che possano guidare la scelta dei veicoli da sostituire. Questi indicatori devono tenere conto non solo del consumo energetico, ma anche delle caratteristiche operative dei mezzi e del loro impatto ambientale e gestionale.

Gli indicatori principali da considerare possono essere ad esempio:

1. **Consumi energetici:** Questo indicatore è cruciale per comprendere l'efficienza di ciascun veicolo. Veicoli con elevati consumi di carburante tradizionale (diesel, benzina) saranno prioritari per la sostituzione con soluzioni a idrogeno o elettriche.
2. **Anzianità del veicolo:** I veicoli più vecchi, con tecnologie obsolete e un'efficienza operativa ridotta, dovrebbero essere tra i primi a essere sostituiti. L'anzianità influisce direttamente sull'affidabilità e sui costi di manutenzione, rendendo la sostituzione vantaggiosa sia in termini ambientali che economici.
3. **Impatto ambientale (emissioni di CO₂):** La quantità di emissioni di CO₂ generata da ciascun veicolo è un altro indicatore chiave. I veicoli che emettono maggiori quantità di gas serra dovrebbero essere oggetto di interventi prioritari per ridurre rapidamente l'impatto ambientale dell'aeroporto.
4. **Disponibilità di infrastrutture:** Un altro indicatore è la capacità dell'aeroporto di supportare l'implementazione di nuovi veicoli a idrogeno o elettrici. Questo implica la disponibilità di infrastrutture per la produzione, stoccaggio e distribuzione di idrogeno, oltre a stazioni di ricarica per i veicoli elettrici.
5. **Autonomia e prestazioni operative:** Veicoli che richiedono lunghe percorrenze o devono essere operativi per lunghi periodi senza interruzioni (ad esempio i bus o i trattori) necessitano di soluzioni che garantiscano un'autonomia sufficiente. In questi casi, l'idrogeno rappresenta una scelta preferibile rispetto all'elettrico, in quanto offre maggiore autonomia e tempi di rifornimento più rapidi.

Questi indicatori chiave consentono di definire una strategia di sostituzione dei mezzi basata su criteri oggettivi, favorendo una transizione verso una flotta a emissioni zero che possa essere efficiente dal punto di vista economico, operativo e ambientale.

Il calcolo del fabbisogno di idrogeno viene poi effettuato considerando, ad esempio, una progressiva integrazione di veicoli alimentati a H₂ all'interno della flotta. Il fabbisogno annuale di idrogeno dipende infatti direttamente dalla percentuale di veicoli sostituiti e dalle loro caratteristiche di consumo. Un possibile piano di transizione graduale per i veicoli coinvolti in aeroporto potrebbe essere il seguente:

1. Entro il 2030 la sostituzione di una piccola porzione della flotta (1%-5%) per rispettare una fase iniziale, in cui vengono convertiti principalmente veicoli a basso consumo, come automobili e alcune macchine della flotta dirigenziale
2. Entro il 2035 la sostituzione di una porzione limitata ma significativa della flotta (5%-10%). In questa seconda fase, è possibile contemplare l'inclusione di veicoli più energivori, come autobus e furgoni, il che comporta un fabbisogno maggiore di idrogeno per garantire la piena operatività dei mezzi
3. Entro il 2040 la sostituzione di una porzione cospicua della flotta (>10%) andando a considerare veicoli come trattori e mezzi airside altamente specializzati, che richiedono quantità più elevate di idrogeno per funzionare a pieno regime. Questo scenario prevede un'infrastruttura di rifornimento completamente operativa e capace di soddisfare le esigenze crescenti della flotta. Inoltre, la disponibilità sul mercato di mezzi specializzati di questo tipo dovrà essere consolidata

Nell'**Allegato 1** viene presentata la stima della domanda, da usare come di riferimento nelle previsioni relative al consumo di idrogeno in area landside e ariside.

4.2.2 Valutazione della produzione/approvvigionamento

Dopo aver stimato la possibile domanda di idrogeno è necessario stimare il potenziale di produzione annua. Come esposto nelle sezioni precedenti, l'idrogeno rinnovabile può essere approvvigionato (e in questo caso il potenziale di produzione equivale al potenziale di approvvigionamento) o prodotto tramite un impianto di elettrolisi locale. L'impianto di elettrolisi locale può, a sua volta, essere alimentato tramite energia rinnovabile prodotta in loco o tramite acquisto di energia rinnovabile con lo strumento PPA (*Power Purchase Agreement*), o un mix delle due. Nel caso di energia rinnovabile prodotta in loco è fondamentale stimare il rapporto tra la potenza dell'elettrolizzatore e la potenza dell'impianto, al fine di caratterizzare la possibile produzione annua di idrogeno.

Si riporta di seguito uno studio condotto presso l'aeroporto di Malpensa nell'ambito del progetto SAVES, considerando la possibilità di installare un impianto fotovoltaico asservito ad un elettrolizzatore. I due *Key Performance Indicators (KPI)* da valutare in questo caso sono il consumo di energia fotovoltaica prodotta (per valutare quanto si riesce a sfruttare l'impianto fotovoltaico) ed il numero di ore equivalenti di funzionamento possibili dell'elettrolizzatore (per capire quanto si riesce a sfruttare l'elettrolizzatore). Si nota, in Figura 14, la possibilità di calibrare la taglia dell'elettrolizzatore per massimizzare lo sfruttamento dell'energia fotovoltaica. Per esempio, con un impianto fotovoltaico da 1 MW, la potenza dell'elettrolizzatore ottimale è di circa 1 MW mostrando un rapporto circa 1:1. Aumentando però la potenza del fotovoltaico la potenza ottimale dell'elettrolizzatore tende a diminuire.

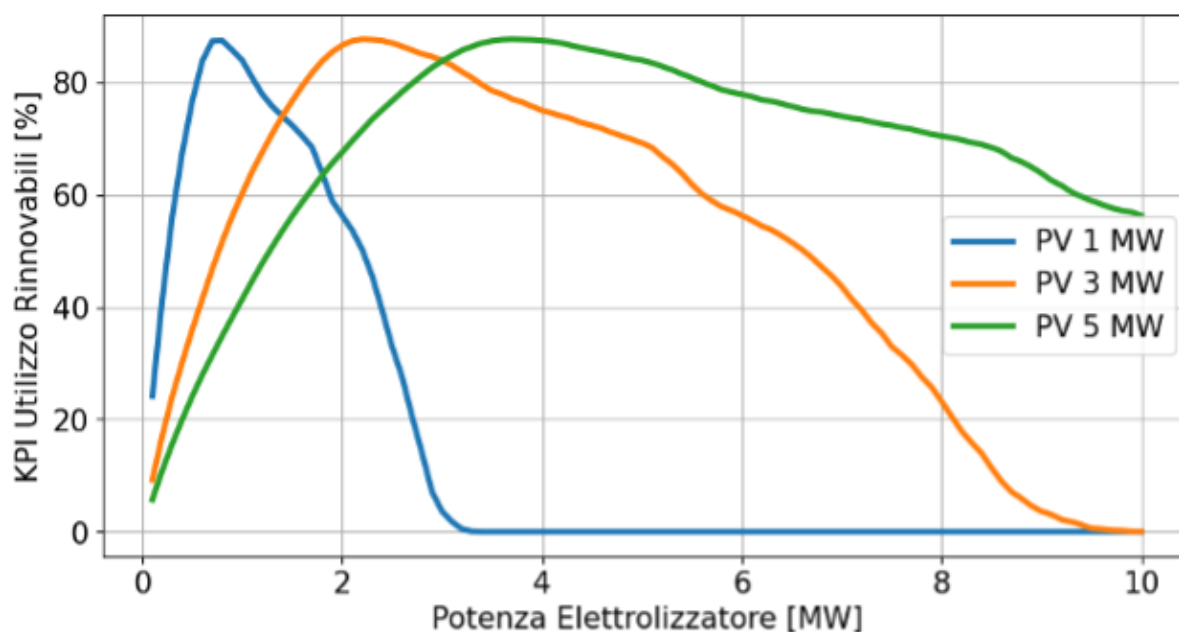


Figura 14 - Esempio di andamento della percentuale di consumo dell'energia rinnovabile in funzione della taglia dell'elettrolizzatore per tre diverse taglie di impianto fotovoltaico

In termini di ore equivalenti, elettrolizzatori alimentati direttamente da fotovoltaico non possono superare le 4000 ore di funzionamento annue. Questo può favorire la diversificazione delle fonti rinnovabili utilizzate, magari aprendo allo scenario di stipulare contratti PPA per garantire un approvvigionamento stabile di energia rinnovabile da fotovoltaico ed eolico, con certificazione di origine, per supportare una produzione di idrogeno verde ottimizzata per il contesto aeroportuale e la sostenibilità ambientale.

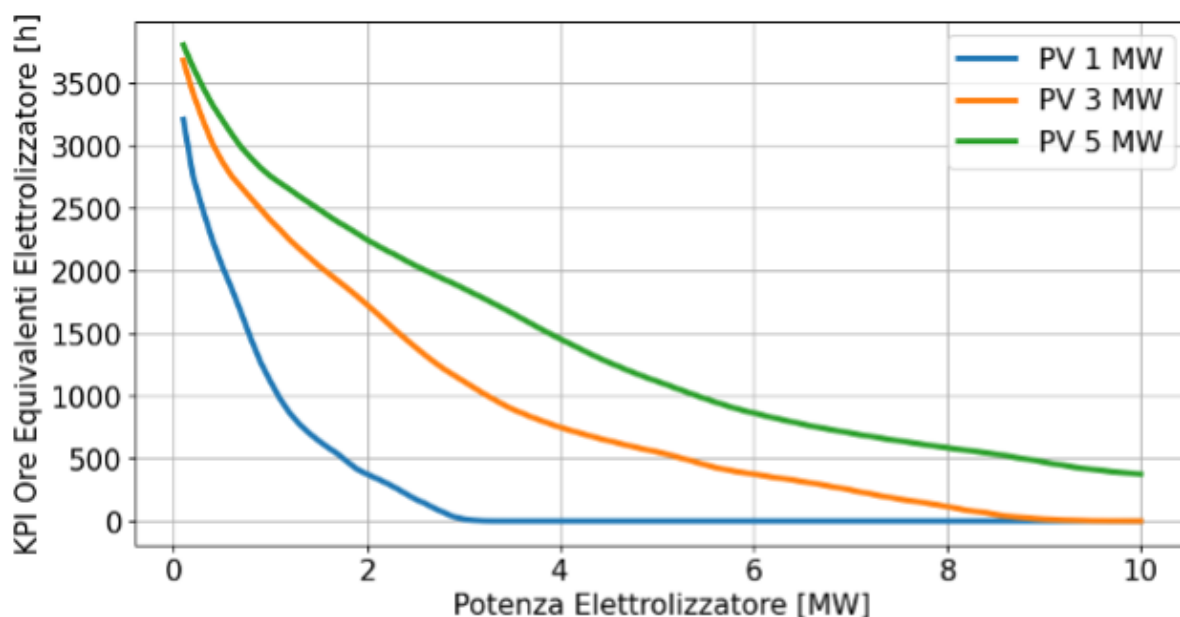


Figura 15 - Esempio di andamento delle ore equivalenti di funzionamento dell'elettrolizzatore in funzione della taglia dell'elettrolizzatore per tre diverse taglie di impianto fotovoltaico

L'analisi appena presentata è stata eseguita con dati di produzione fotovoltaica su base oraria. È possibile arrivare a stime simili anche utilizzando dati aggregati su base annua perdendo solo parzialmente efficacia nello studio del problema.

Una volta nota la quantità di energia rinnovabile annua è possibile calcolare la produzione di idrogeno sapendo che in media un elettrolizzatore alcalino consuma 50 kWh/kgH₂ di energia elettrica per chilogrammo di idrogeno prodotto.

Nel caso in cui l'idrogeno sia prodotto localmente si può stimare il costo dello stesso prodotto da un progetto pilota tramite il *Levelized Cost of Hydrogen (LCOH)* che tiene conto di tutti i costi da sostenere per la produzione dell'idrogeno attualizzandoli all'anno iniziale di investimento:

$$LCOH = \frac{\sum_i \left[CAPEX_i + \sum_{n=1}^N \frac{OPEX_{i,n}}{(1+z)^n} \right]}{\sum_{n=1}^N \frac{M_{H_2,n}}{(1+z)^n}},$$

dove *CAPEX* è la quota capitale dell'investimento che viene sostenuta all'inizio, *OPEX* è la spesa operativa che viene sostenuta ogni anno e *M_{H₂}* è la massa di idrogeno prodotta annualmente misurata in chilogrammi, mentre *z* è il costo medio ponderato del capitale. Il pedice *i* indica i vari sottosistemi possibili (elettrolizzatore, accumulo, distribuzione ed hydrogen refueling station, impianto di energia rinnovabile), mentre invece *n* indica l'anno di riferimento ed arriva fino all'anno *N* di durata totale del progetto.

Si riportano, a titolo di esempio, i costi parametrici di investimento, comprensivi degli oneri legati alla realizzazione delle opere civili ¹⁷, secondo le attuali tendenze di mercato:

Tabella 4 - Valori parametrici per la stima del LCOH

Parametro	Valore
CAPEX elettrolizzatore Alcalino	1.600 €/kW
OPEX elettrolizzatore Alcalino	3% del CAPEX
Costo di rimpiazzo dello stack elettrolizzatore Alcalino	30% del CAPEX
Vita utile dello stack elettrolizzatore Alcalino	65.000 h
CAPEX accumulo e distribuzione	2000 €/kW
OPEX accumulo e distribuzione	3% del CAPEX
CAPEX hydrogen refueling station	6.000 €/(kgH ₂ giorno)
OPEX hydrogen refueling station	3% del CAPEX
CAPEX fotovoltaico	650 €/kW
OPEX fotovoltaico	2% del CAPEX
CAPEX eolico	1200 €/kW
OPEX eolico	3% del CAPEX

Attualmente in Italia la produzione di idrogeno tramite energia rinnovabile ha un costo compreso tra $LCOH = 6 \text{ €/kg}$ e $LCOH = 8 \text{ €/kg}$ ¹⁸, al quale poi possono essere aggiunti tra i 5 €/kg ed i 7 €/kg per l'idrogeno trattato tramite stazioni di rifornimento. Specifici progetti possono però avere costi diversi in base a specifiche situazioni e soprattutto il mercato dei sistemi ad idrogeno è in costante evoluzione.

Si fornirà nel materiale allegato alle linee guida un esempio applicativo di stima del costo di produzione.

4.2.3 Valutazione delle emissioni di CO₂ evitate

Una volta determinato il piano di implementazione delle tecnologie ad idrogeno in ambito aeroportuale (in questo documento è stato trattato principalmente l'uso dell'idrogeno per mobilità) è possibile calcolare in maniera approssimata, ma efficace, l'ammontare di emissioni annue di anidride carbonica che vengono risparmiate. Nello specifico è stato stimato dal Joint Research Center¹⁹ che il fattore emissivo Well to Wheel, che considera cioè tutti

¹⁷ Si consiglia di tenere conto fin dalle prime fasi dello studio dei costi necessari per le opere civili, inserendo il valore nella sezione **OPEX** accumulo e distribuzione.

¹⁸ Cost of hydrogen production

<https://observatory.clean-hydrogen.europa.eu/hydrogen-landscape/production-trade-and-cost/cost-hydrogen-production#:~:text=Hydrogen%20production%20costs%20via%20electrolysis,median%20of%206.20%20EUR%2Fkg>.

¹⁹ WELL-TO-TANK Report version 4.a: JEC WELL-TO-WHEELS ANALYSIS

i processi dall'estrazione fino all'utilizzo nel veicolo, del diesel è $die_{diesel} = 319 \text{ gCO}_{2,\text{eq}}/\text{kWh}$ e che quello della benzina è poco inferiore e pari a $e_{benzina} = 313 \text{ gCO}_{2,\text{eq}}/\text{kWh}$. Si ricordi inoltre che il potere calorifico inferiore del diesel²⁰ è pari mediamente a $LHV_{diesel} = 10 \text{ kWh/l}$ e invece quello della benzina è pari mediamente a $LHV_{benzina} = 8.9 \text{ kWh/l}$. È possibile quindi stimare le emissioni di ogni singolo mezzo censito tramite le seguenti relazioni:

$$E_{CO_2,diesel} = V_{diesel} * e_{diesel} * LHV_{diesel},$$

$$E_{CO_2,benzina} = V_{benzina} * e_{benzina} * LHV_{benzina},$$

dove V_{diesel} e $V_{benzina}$ rappresentano rispettivamente il volume totale di diesel o benzina consumato dal singolo mezzo. Le relazioni possono essere applicate a tutto il parco mezzi calcolando il contributo emissivo totale e poi per i vari scenari possono essere sottratte le emissioni dei mezzi che si intende riconvertire ad idrogeno. Il risultato finale può essere rappresentato sia in termini globali di riduzione di tonnellate di anidride carbonica, sia in termini percentuali rispetto alle emissioni totali del parco veicoli. Questo tipo di calcolo può anche essere iterativo in quanto supposta una data sostituzione con mezzi ad idrogeno è possibile valutarne l'impatto ed eventualmente rivedere il piano di sostituzione se si vuole raggiungere un certo target di riduzione delle emissioni.

Nell'**Allegato 1** viene presentata una metodologia di valutazione delle emissioni di CO₂ evitate grazie all'implementazione di sistemi che utilizzano tecnologie ad idrogeno.

4.3 Metodologia proposta nell'Allegato 1

L'Allegato 1 fornisce una valutazione approfondita del potenziale dell'idrogeno come fonte di energia sostenibile in ambito aeroportuale. A tal fine, si rende necessaria una mappatura capillare dei veicoli operanti nel sedime aeroportuale, suddivisi tra area airside e landside. Tale mappatura costituisce un elemento fondamentale per un'efficace gestione della flotta veicoli, consentendo di creare un modello decisionale replicabile per valutare l'opportunità di retrofitting tecnologico o sostituzione, oltre ad ottimizzare le performance del parco veicolare, in particolare in un ambiente complesso come quello aeroportuale.

L'analisi, condotta attraverso una raccolta dati mirata sulle realtà operanti in aeroporto, identifica le diverse tipologie di veicoli coinvolti, classificandoli in base a parametri di utilizzo specifici. L'obiettivo primario è quello di valutare il potenziale di conversione dei mezzi attualmente in uso verso una tecnologia a idrogeno, quantificando il relativo impatto in termini di riduzione delle emissioni di CO₂ e fornendo una stima dei costi associati, sia di investimento che operativi.

La mappatura dei veicoli nell'area airside, dedicata alle operazioni aeronautiche, si concentra su tutti i mezzi che operano a stretto contatto con gli aeromobili, con particolare attenzione a quelli coinvolti nel rifornimento, nella manutenzione, nella movimentazione e nelle operazioni di supporto a terra. La mappatura di questi veicoli richiede un'analisi dettagliata delle loro caratteristiche tecniche e operative, come età, chilometraggio, frequenza d'uso e tipo di alimentazione. Questa analisi diventa particolarmente utile nel pianificare il passaggio verso una flotta più sostenibile, composta da veicoli elettrici o alimentati a idrogeno. Parallelamente, viene effettuata una mappatura

<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC85326>

²⁰ Fuels - Higher and Lower Calorific Values https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html

dei veicoli operanti nell'area landside, destinata all'accesso pubblico e comprensiva di terminal, parcheggi e vie di accesso, al fine di fornire un quadro completo del parco veicolare.

Tale processo consente di elaborare un'analisi esaustiva del parco veicoli, fornendo una visione d'insieme dettagliata che supporta una gestione strategica per la pianificazione di interventi mirati volti al miglioramento, alla sostituzione o all'ottimizzazione dei mezzi. Viene inoltre fornita una stima delle emissioni di CO₂ evitabili considerando i dati inseriti in input, rappresentanti il parco veicolare presente in aeroporto. L'allegato consente inoltre di fare una stima economica che tiene conto dei costi di investimento e dei costi operativi.

Il diagramma di flusso di seguito riportato rappresenta il processo di analisi proposto nell'allegato, sviluppabile in cinque fasi fondamentali:

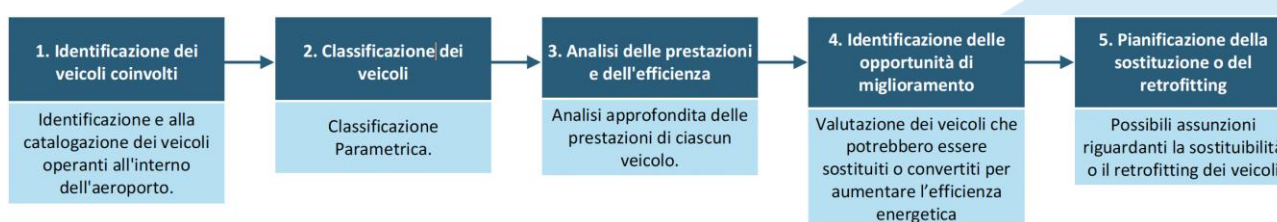


Figura 16 - Flusso raccolta dati Allegato 1

1. **Identificazione dei veicoli coinvolti:** La prima fase consiste nell'identificazione e la catalogazione di tutti i veicoli operanti all'interno dell'aeroporto. Questa fase mira a creare un inventario completo del parco veicolare esistente, fornendo una base di partenza per le analisi successive.
2. **Classificazione dei veicoli:** I veicoli identificati vengono classificati secondo parametri specifici, che possono includere la tipologia di veicolo, l'utilizzo, le emissioni, l'età, ecc. Questa classificazione parametrica permette di raggruppare i veicoli con caratteristiche simili e di indirizzare le analisi in modo più mirato.
3. **Analisi delle prestazioni e dell'efficienza:** In questa fase, si analizzano in dettaglio le prestazioni di ciascun veicolo, con un focus particolare sull'efficienza energetica e sulle emissioni. L'obiettivo è valutare l'impatto ambientale di ogni veicolo e identificare le aree di miglioramento.
4. **Identificazione delle opportunità di miglioramento:** Sulla base dell'analisi delle prestazioni, si individuano le opportunità di miglioramento per ciascun veicolo. Ciò può includere la sostituzione con veicoli più efficienti o l'implementazione di tecnologie di retrofitting per migliorare le prestazioni e ridurre le emissioni.
5. **Pianificazione della sostituzione o del retrofitting:** L'ultima fase prevede la pianificazione concreta degli interventi di sostituzione o retrofitting. Si valutano le implicazioni economiche, logistiche e operative di ciascuna opzione, tenendo in considerazione fattori come i costi, i tempi di implementazione, e la disponibilità di infrastrutture di supporto (ad esempio, stazioni di ricarica o di rifornimento a idrogeno). Si definiscono, infine, le priorità e le strategie per l'implementazione delle soluzioni scelte.

In conclusione, si evidenzia che l'Allegato 1 è da ritenersi un esempio applicativo, comunque apprezzabile, attraverso il quale è possibile effettuare delle previsioni anche in relazione allo stato dell'arte ad oggi disponibile.

5 L'integrazione dell'idrogeno nelle procedure aeroportuali

Il paragrafo descrive le procedure e le considerazioni necessarie per l'introduzione dell'idrogeno come fonte energetica negli aeroporti. Si articola principalmente in tre sezioni: la prima tratta la governance del piano di transizione, evidenziando la necessità di una pianificazione strategica a lungo termine, la creazione di una struttura dedicata e la comunicazione efficace. La seconda sezione approfondisce l'analisi di adeguatezza delle infrastrutture esistenti, focalizzandosi sui requisiti di approvvigionamento idrico, consumo energetico e footprint degli impianti di elettrolisi e liquefazione, con proiezioni future sulle esigenze di spazi. Infine, la terza sezione si concentra sulla gestione integrata dei rischi, analizzando le proprietà dell'idrogeno, le metodologie di risk assesment e le azioni di mitigazione necessarie per garantire la sicurezza operativa e la conformità alle normative.

5.1 Governance del piano di transizione

I processi di transizione di successo, o più in generale di cambiamento, richiedono visione strategica, capacità realizzativa ed efficacia della governance. L'introduzione dell'idrogeno in aeroporto deve essere supportata da una organizzazione dedicata che assegni responsabilità ed obiettivi ben precisi a persone e/o comitati decisionali.

La transizione all'idrogeno richiede una pianificazione dettagliata che tenga conto di tutti gli aspetti coinvolti, dalla progettazione delle infrastrutture alla formazione del personale. È indispensabile, inoltre, una valutazione approfondita dei rischi associati all'utilizzo dell'idrogeno e la definizione di misure di sicurezza adeguate. Introdurre l'idrogeno in aeroporto non può ricondursi alla mera scelta di tecnologie e soluzioni presenti sul mercato, ma è un cambiamento che deve necessariamente investire tutta l'organizzazione con obiettivi chiari e misurabili nel tempo. Un percorso di trasformazione che miri all'implementazione dell'H₂ in ambito aeroportuale deve essere affrontato con un approccio dinamico secondo diverse fasi. Si riportano, a titolo esemplificativo, gli elementi più rilevanti che dovrebbero caratterizzare un processo di transizione verso soluzioni innovative:

- 1) individuare o costituire un gruppo e/o una funzione organizzativa dedicata al cambiamento, con le giuste competenze per esaminare le realtà del mercato, le principali opportunità e promuovere iniziative all'interno dell'organizzazione;
- 2) creare una visione e sviluppare una strategia all'interno dell'organizzazione, con l'individuazione di progetti significativi da portare avanti, creazione di consenso, individuazione di stakeholders per collaborazioni esterne e chiara definizione degli obiettivi;
- 3) comunicare la visione: impiegare tutti i canali disponibili per comunicare la visione e la strategia e condividere i risultati con gli stakeholders esterni di riferimento;
- 4) pianificare obiettivi di lungo termine, conseguendo al contempo successi concreti dimostrabili a breve termine (attraverso, ad esempio, sperimentazioni e progetti pilota);
- 5) consolidare i progressi e promuovere ulteriori cambiamenti, con nuovi progetti ed attori favorevoli al cambiamento;
- 6) rendere evidenti verso l'interno e l'esterno i risultati delle innovazioni, sviluppare i mezzi per consolidarle ed assicurarne il successo nel futuro.

In linea generale, l'introduzione dell'idrogeno come vettore energetico negli aeroporti rappresenta una trasformazione significativa che richiede una valutazione attenta e strutturata del cambiamento proposto. Il Regolamento (UE) n. 139/2014 fornisce il quadro normativo essenziale per affrontare questo tipo di cambiamenti

nel settore aeronautico, per redigere le necessarie procedure per la gestione delle modifiche e l'eventuale aggiornamento del Manuale di Aeroporto.

Si riportano, a tal proposito, gli elementi salienti del processo di gestione del cambiamento in ambito aeroportuale, così come descritto nella linea guida Enac 2019/003-APT (Gestione delle modifiche nell'ambito della sorveglianza della certificazione di aeroporto ai sensi del regolamento (UE) 139/2014). Tali indicazioni valgono per gli aeroporti certificati secondo la normativa EASA, ma possono costituire un valido riferimento per tutti gli aeroporti e gli operatori coinvolti nel piano di transizione.

5.1.1 Gestione delle proposte di modifica

La norma ADR.OR.B.040 ("Changes") del Regolamento (UE) n. 139/2014 definisce i criteri generali da adottare e gli obiettivi di una procedura di change management, in particolare:

- determinare le interdipendenze con ogni soggetto potenzialmente interessato dal cambiamento;
- assicurare una valutazione esaustiva del cambiamento
- individuare le interazioni tra i vari soggetti interessati dal cambiamento

Ciò premesso, i cambiamenti che interessano gli Aeroporti certificati in accordo al Regolamento (UE) possono essere suddivisi in:

- cambiamenti che richiedono **preventiva approvazione dell'Autorità (prior approval)**
- cambiamenti che **non richiedono approvazione preventiva da parte dell'Autorità ('changes not requiring prior approval')**.

La norma definisce inoltre gli obblighi e le responsabilità dell'Autorità competente - nell'ambito delle attività di oversight di propria competenza - con riferimento alla valutazione ed approvazione delle modifiche proposte dal Gestore.

A tal fine, il Gestore aeroportuale definisce una specifica procedura - soggetta ad esplicita approvazione da parte di Enac - volta a disciplinare la gestione delle modifiche (Manuale di Aeroporto, Section B par. 2.2.10 – cfr. AMC3 ADR.OR.E.005).

Modifiche che richiedono preventiva approvazione

Sono soggette a preventiva approvazione dell'Autorità Competente, come specificato nelle IR applicabili (rif.GM1 ADR.OR.B.040(a);(b)):

- a) l'utilizzo di AltMoC ai sensi della norma ADR.OR.A.015;
- b) le procedure di gestione e notifica delle modifiche che non richiedono approvazione ("changes not requiring prior approval" - rif. ADR.OR.B.015(b)(4)) e le sue variazioni;
- c) le modifiche alla base di certificazione dell'Aeroporto ed alla Specifica di certificazione, per quanto richiesto da ADR.OR.B.040(a)(1);
- d) le modifiche relative ad equipaggiamenti critici ai fini di safety ADR.OR.B.040(a)(1);
- e) le modifiche con impatto significativo sugli elementi costitutivi del Management System del Gestore richiesti da ADR.OR.D.005(b);
- f) la variazione del livello di protezione RFFS (Rescue and Firefighting Services), per quanto previsto da ADR.OPS.B.010(a)(1)(2);

- g) le modifiche alle low visibility procedures (ADR.OPS.B.045(b);
- h) le operazioni con aa/mm di cod. letterale superiore al codice di riferimento dell'aeroporto (ADR.OPS.B.090(a)).
- i) altre approvazioni richieste ai sensi della normativa comunitaria (es. deviazioni dalle CS EASA, ostacoli alla navigazione aerea).

Per tutti i casi sopra riportati (in accordo a quanto previsto da ADR.OR.B.040(c)) - nonché per gli ulteriori casi per i quali è prevista un'approvazione ai sensi della normativa nazionale - il Gestore è tenuto ad inoltrare apposita richiesta di approvazione ad Enac - prima dell'implementazione della modifica, al fine di consentire alle competenti strutture dell'Ente di valutare la conformità della stessa al Regolamento Basico e sue norme attuative, di imporre eventuali condizioni da rispettare nel corso dell'implementazione della modifica nonché di apportare gli emendamenti eventualmente necessari al Certificato ed alla relativa Specifica. Per apportare qualsiasi modifica (cfr. ADR.OR.B.040(e)), che richieda un'approvazione preliminare, è necessario ottenere un'autorizzazione formale dalle strutture competenti dell'Ente. L'unica eccezione a questa regola riguarda le modifiche urgenti al Manuale di Aeroporto, per le quali potrebbero esserci procedure specifiche.

In linea generale, sono da considerarsi modifiche che richiedono preventiva approvazione tutte quelle che comportano una modifica al manuale di aeroporto o alle caratteristiche fisiche dell'aeroporto.

Le modifiche al Manuale di Aeroporto sono normalmente derivanti da variazioni delle pertinenti informazioni di carattere generale (es. dati amministrativi), da modifiche alle caratteristiche fisiche dell'aeroporto, da variazioni al management system del Gestore o da variazioni delle procedure operative ivi contenute. Ogni cambiamento al Manuale di Aeroporto deve essere ben documentato e, nella maggior parte dei casi, approvato.

Gli interventi di nuova realizzazione e/o modifica di infrastrutture ed impianti airside, così come gli interventi da realizzare in area landside laddove aventi impatto sui requisiti di certificazione (es. costituzione di ostacoli e/o pericoli), devono essere valutati quali "change" ai sensi di quanto previsto dal punto norma ADR.OR.B.040 al fine di determinarne l'impatto sulle condizioni di safety del sistema aeroporto inteso in tutte le sue componenti (fisiche, operative ed organizzative), ivi inclusi i soggetti terzi eventualmente affetti dalla modifica (cfr. in particolare ADR.OR.B.040 punto (f)).

È, tuttavia, opportuno precisare che il concetto di "change" - così come inteso nell'accezione del Regolamento UE 139/2014, in ADR.OR.B.040 - va riferito unicamente agli interventi che, a regime ovvero dopo la conclusione dei relativi lavori, **determinano una variazione del layout delle infrastrutture e degli impianti** (inclusa l'eventuale introduzione o modifica di ostacoli alla navigazione aerea) e/o una modifica delle caratteristiche operative dell'aeroporto.

Ciò premesso, ogni qualvolta un progetto sottenda un "change" ai sensi di quanto previsto da ADR.OR.B.040, il Gestore è tenuto a sviluppare - in aggiunta a quanto previsto dalla normativa di settore in materia di progettazione - una valutazione di impatto e produrre la seguente ulteriore documentazione a supporto della modifica (Cfr. LG-2019/003-APT Cap.3):

- livello di fattibilità tecnica ed economica / definitivo;
- livello di progettazione esecutiva (o definitiva in caso di appalto integrato);
- compliance Assessment Document;
- Safety Assessment (Cfr. LG-2019/003-APT Cap.5).

La documentazione di cui sopra deve essere trasmessa alla Direzione territorialmente competente, owner del processo di sorveglianza della certificazione di aeroporto nonché, in copia, alla Direzione competente in materia di Sviluppo e Approvazione Progetti.

Le proposte di modifica devono essere accompagnate da:

- **Documentazione completa:** Ogni proposta di modifica deve essere accompagnata da tutta la documentazione richiesta dalle norme ADR.OR.B.040(f) e ADR.OR.E.005.
- **Documento di sintesi:** È obbligatorio presentare un documento (Change Management Document, cfr. Form Allegato 1 LG-2019/003-APT), che descriva in modo chiaro e conciso la modifica proposta, le ragioni che la motivano e il soggetto responsabile della sua promozione all'interno dell'organizzazione (Process Owner).
- **Valutazione dell'impatto:** Il documento di sintesi deve specificare in modo puntuale quali saranno le conseguenze della modifica sulle diverse aree coinvolte.

In ogni caso, è richiesto al Gestore aeroportuale di (cfr. ADR.OR.B.040(f)):

- 1) determinare le interdipendenze con tutte le parti (anche terze) sulle quali la modifica può avere impatto, pianificare e sviluppare un safety assessment in coordinamento con tali organizzazioni;
- 2) allineare in modo sistematico i presupposti delle analisi e le mitigazioni con le parti interessate;
- 3) assicurare una valutazione globale della modifica, valutando ogni necessaria interazione;
- 4) assicurare che il safety assessment sia supportato da argomentazioni complete e valide, evidenze e criteri di safety opportunamente documentati, e che la modifica sia finalizzata in generale ad un miglioramento del livello di safety.

Il Gestore deve fornire puntuale evidenza della valutazione degli elementi sopra elencati attraverso la documentazione a supporto della modifica.

Infine, nel caso di progetti - qualora questi si configurino quali modifiche ai sensi di ADR.OR.B.040 (tipicamente opere relative alle aree airside), la documentazione di change management dovrà essere allegata ai pertinenti elaborati di progetto.

Modifiche che non richiedono approvazione

Le modifiche differenti da quelle evidenziate nel precedente paragrafo non richiedono, in linea generale, una specifica approvazione da parte dell'Enac. Ai sensi della richiamata norma ADR.OR.B.040, per tale tipologia di modifiche è prevista la sola notifica all'Autorità in accordo alla pertinente procedura del Manuale di Aeroporto (soggetta ad esplicita approvazione).

Quanto sopra ferma restando la necessità, da parte del Gestore, di effettuare le proprie valutazioni di impatto e di safety, anche in forma semplificata, in funzione dell'effettiva portata della stessa (tali valutazioni non necessitano di essere allegate alla notifica; è comunque fatta salva la facoltà dell'Enac di richiedere al gestore tale documentazione per successive verifiche).

Per gli aspetti inerenti alla presente linea guida, si riportano, a titolo esemplificativo ma non esaustivo, esempi di modifiche che non necessitano di approvazione:

Organizzazione

- variazione di figure non soggette ad accettazione di Enac (es. deputy),
- variazione dell'assetto organizzativo, privo di impatto sulla struttura e le responsabilità definite ai fini della certificazione di aeroporto,
- esternalizzazione di attività del Gestore rientranti tra quelle definite nella Parte OPS del Regolamento (UE) n. 139/2014, purché affidate nel rispetto di quanto previsto da ADR.OR.D.010 (Contracted Activities).

Manuale di Aeroporto / procedure operative

- modifica di riferimenti normativi, nominativi e recapiti,
- modifiche dei contenuti del Manuale - e sue procedure - conseguenti a modifiche infrastrutturali già approvate (es. modifica planimetrie derivanti dalla realizzazione di interventi approvati),
- modifica di allegati ed appendici alle procedure (es. checklist), salvo ove diversamente stabilito,
- modifiche al Manuale - e sue procedure - derivanti dall'implementazione di azioni correttive a seguito di rilievi Enac, preventivamente accettate,
- modifiche al Manuale - e sue procedure - derivanti dall'implementazione di azioni correttive a seguito di rilievi da audit interni o da esigenze di miglioramento scaturite da riesame interno del Gestore, purché sia evidenziato che le modifiche perseguono il miglioramento dei livelli di safety e non riguardano una riduzione delle risorse allocate (oltre che non rientrino nei casi in cui è espressamente prevista la preventiva approvazione),
- modifica della tipologia di attrezzature ed equipaggiamenti richiamati all'interno del Manuale - e sue procedure - purché rientranti tra quelli accettati da Enac, se applicabile (es. 'friction tester').
- Modifiche e aggiornamenti alla parte A del Manuale di Aerodromo;
- PEA: modifiche derivanti dall'implementazione di azioni correttive a seguito di esercitazioni o emergenze reali, preventivamente approvate dall'AEC, che siano coerenti con il contesto normativo e non incidano sul riparto dei compiti e delle responsabilità dei vari attori coinvolti;
- PEA: modifica alle infrastrutture e mezzi di supporto (es. sale di accoglienza individuate, tipologia di risorse/mezzi impiegati) condivisi in ambito AEC;
- PEA: modifiche ai riferimenti e contatti.
- Modifiche editoriali alla documentazione.

Infrastrutture e impianti

- variazioni al layout della viabilità veicolare al di fuori dell'area di movimento; variazioni temporanee alla viabilità veicolare correlate alla presenza di cantieri per lavori di manutenzione ordinaria o per opere approvate;
- manutenzioni ordinarie in genere;
- installazione gru, preventivamente valutate di concerto con il Provider ANS, che non forino le superfici di limitazione degli ostacoli e non interferiscano con le radio-assistenze.

La notifica delle modifiche che non richiedono approvazione deve essere trasmessa alla Direzione territorialmente competente e deve contenere informazioni essenziali sulla modifica, come:

- **Descrizione sintetica:** Una breve spiegazione della modifica, supportata dalla sua classificazione in base al Manuale di Aeroporto.
- **Responsabile:** L'individuazione del process owner (PH) responsabile della modifica.
- **Motivazioni:** I motivi che hanno portato all'introduzione della modifica.
- **Valutazione d'impatto:** I risultati della valutazione effettuata dal Gestore per valutare l'impatto della modifica.
- **Stakeholder coinvolti:** L'elenco delle parti interessate dalla modifica.
- **Documentazione:** L'indicazione precisa delle sezioni del Manuale di Aeroporto (o altri documenti correlati) che sono state modificate.

Il Gestore può procedere con la modifica solo dopo aver ricevuto la conferma di ricezione della notifica da parte dell'ente competente.

5.2 Analisi di adeguatezza delle infrastrutture esistenti

L'implementazione di una filiera dell'idrogeno presso l'aeroporto è accompagnata da una serie di sfide complesse, che richiedono soluzioni innovative ed una pianificazione strategica delle infrastrutture. Tra le principali criticità si annoverano la necessità di garantire una produzione di idrogeno su scala adeguata, la creazione di efficienti sistemi di stoccaggio e distribuzione, e l'adeguamento delle tecnologie di rifornimento per soddisfare le esigenze di veicoli e mezzi sia nell'area airside che landside. In questo contesto, è fondamentale un approccio integrato e oculato, che sappia anticipare i bisogni futuri e ottimizzare le risorse disponibili. Ad esempio, è necessario verificare l'adeguatezza in termini di:

- **Selezione dei siti:** Identificare e valutare i siti più adatti per la produzione e lo stoccaggio dell'idrogeno all'interno o nelle vicinanze dell'aeroporto, in coerenza con i piani di sviluppo aeroportuali. La selezione dei siti deve tenere conto di vari fattori, tra cui la vicinanza alle fonti di energia rinnovabile (come impianti fotovoltaici), la disponibilità di spazio, la sicurezza e l'accessibilità. È importante anche considerare l'impatto ambientale e le normative locali.
- **Progettazione delle stazioni di rifornimento:** Le stazioni di rifornimento per l'idrogeno devono essere progettate per garantire efficienza, sicurezza e facilità d'uso. Questo include la scelta delle tecnologie di rifornimento (ad esempio, rifornimento di idrogeno gassoso ad alta pressione o di idrogeno liquido), la capacità di stoccaggio, i sistemi di sicurezza e le modalità di rifornimento per diversi tipi di veicoli e aeromobili. Le stazioni devono essere posizionate strategicamente per servire efficacemente tutte le aree operative dell'aeroporto.
- **Pianificazione della rete di distribuzione:** La rete di distribuzione dell'idrogeno deve essere progettata per garantire un flusso continuo e sicuro di idrogeno dalle unità di produzione e stoccaggio alle stazioni di rifornimento e ai punti di utilizzo. Questo include la progettazione di tubazioni, valvole, compressori e altri componenti necessari per il trasporto dell'idrogeno. È essenziale considerare la ridondanza e la resilienza della rete per evitare interruzioni del servizio.

Ad esempio, il posizionamento di una eventuale unità di elettrolisi, comprendente l'unità di demineralizzazione dell'acqua, l'elettrolizzatore con relativo sistema di raffreddamento e l'unità di purificazione dell'idrogeno, non deve essere casuale, ma studiato strategicamente sia sulla base degli utilizzi finali a cui è destinato l'idrogeno, che impattano a loro volta la logistica e lo stoccaggio, sia sui protocolli di sicurezza necessari per il corretto svolgimento delle funzioni aeroportuali. Il sito per l'installazione del sistema di produzione di idrogeno deve soddisfare una serie di requisiti fondamentali:

- **Disponibilità di spazio:** L'area deve essere sufficientemente ampia per ospitare tutti i componenti del sistema, compresi eventuali sistemi di stoccaggio.
- **Accessibilità:** Il sito deve essere facilmente raggiungibile per consentire le operazioni di installazione, manutenzione e trasporto dell'idrogeno.
- **Infrastrutture:** La presenza di infrastrutture esistenti, come reti elettriche o di distribuzione del vapore, può facilitare l'integrazione del sistema di produzione di idrogeno.
- **Sicurezza:** Il sito deve essere scelto in modo da minimizzare i rischi per la sicurezza delle persone e dell'ambiente.

La scelta del sito deve tenere conto di fattori quali la vicinanza ad altre infrastrutture, la disponibilità di acqua e la facilità di accesso per le operazioni di manutenzione. L'obiettivo deve essere sempre quello di ottimizzare l'integrazione del sistema di produzione di idrogeno nel contesto più ampio dell'aeroporto.

Sarà determinante, quindi, la vicinanza ad altre infrastrutture energetiche esistenti, come centrali di cogenerazione o impianti di produzione di energia rinnovabile, per massimizzare l'efficienza energetica complessiva dell'aeroporto. La lunghezza e la configurazione delle pipeline di distribuzione dovranno poi variare in base alle dimensioni e alla geometria di ciascun aeroporto.

Le seguenti informazioni forniscono indicazioni per la valutazione dell'inserimento di sistemi operanti con idrogeno in ambito aeroportuale.

Approvvigionamento idrico per il processo di elettrolisi.

Per il processo di elettrolisi, sono necessari circa 9 kg di acqua demineralizzata per produrre ogni chilogrammo di idrogeno. La quantità di acqua richiesta può variare sensibilmente in base alla purezza dell'acqua e alla tecnologia di elettrolisi impiegata, poiché queste influenzano sia il rendimento del processo che i fabbisogni complessivi. Quando si utilizza acqua potabile prelevata da un acquedotto rispetto a quella estratta da un pozzo artesiano, le esigenze di pretrattamento differiscono: l'acqua da pozzo, ad esempio, richiede un processo di depurazione più intensivo, il quale genera una maggiore quantità di acqua di scarto, aumentando i consumi complessivi.

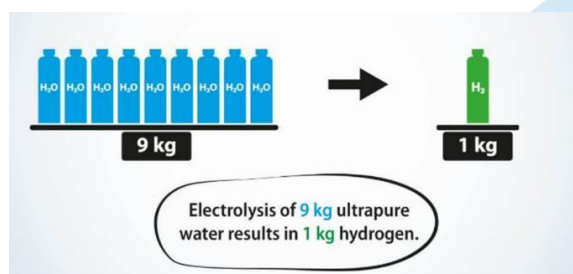


Figura 17 - Acqua (pura) necessaria al processo di elettrolisi

Se consideriamo una potenza di elettrolisi nell'ordine dei megawatt, è necessario garantire un flusso costante di circa 200 litri di acqua distillata all'ora, come mostrato nella Figura 18. Questo fabbisogno richiede quindi un'infrastruttura di approvvigionamento e trattamento dell'acqua adeguata, capace di garantire una purezza costante e compatibile con i requisiti degli impianti elettrolitici e dei loro cicli operativi.

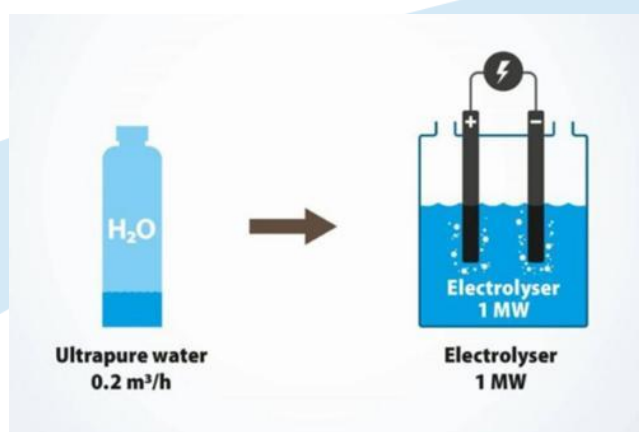


Figura 18 - Acqua (pura) necessaria su base oraria

È necessario, tuttavia, approfondire nelle fasi successive la disponibilità idrica necessaria per alimentare centinaia di MW di elettrolisi. Questo significa verificare se l'acqua richiesta per tali volumi possa essere garantita dall'acquedotto comunale o se sia più opportuno fare affidamento su pozzi artesiani, già esistenti o di nuova realizzazione, all'interno del sedime aeroportuale, soprattutto per gli scenari che prevedono una produzione di idrogeno on-site. A seconda della tipologia d'acqua in ingresso, la quantità di idrogeno prodotta potrebbe variare. Di conseguenza, per rendere pura l'acqua in ingresso è necessario un piccolo dispendio energetico. L'approvvigionamento di acqua su larga scala rappresenta infatti un elemento critico sia in termini di continuità della fornitura sia di impatto ambientale e costi operativi. Occorrerà considerare attentamente:

- **Capacità delle infrastrutture esistenti:** l'acquedotto comunale e i pozzi dovranno essere valutati in termini di portata disponibile e sostenibilità a lungo termine.
- **Qualità e trattamento dell'acqua:** per l'elettrolisi sono necessari standard di purezza elevati che, in caso di prelievo da pozzi, implicheranno processi aggiuntivi di depurazione e demineralizzazione.
- **Possibilità di ampliamento:** valutare la fattibilità di nuovi pozzi artesiani o dell'espansione delle infrastrutture idriche esistenti per garantire un approvvigionamento continuativo anche nelle fasi di picco di produzione.

Infine, per una corretta pianificazione infrastrutturale, sarà importante considerare anche il bilancio idrico complessivo dell'aeroporto, valutando l'impatto sui consumi complessivi e integrando eventuali strategie di recupero e riciclo delle acque di processo. Questo approccio ridurrebbe gli impatti ambientali, ottimizzerebbe i costi e assicurerebbe che l'aeroporto disponga di una supply chain idrica sostenibile, elemento fondamentale per supportare l'evoluzione verso un'economia dell'idrogeno.

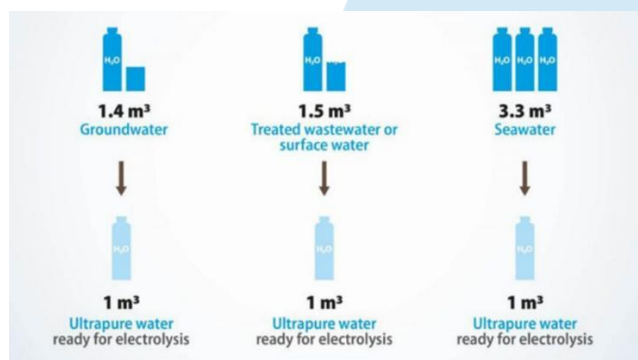


Figura 19 - Quantitativi di H₂O in ingresso a seconda della propria tipologia

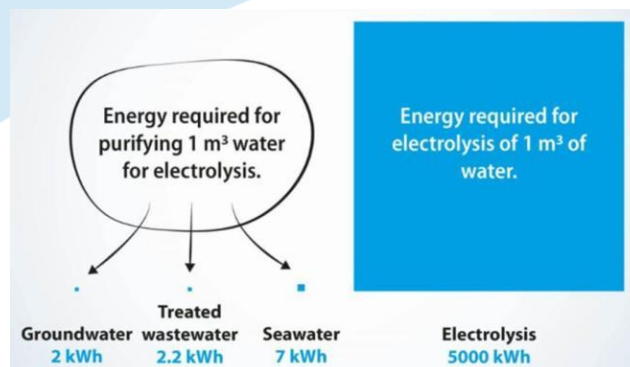


Figura 20 - Energia necessaria per la purificazione a seconda dell'acqua in ingresso

Valutazione dell'energia e potenza necessaria al processo di elettrolisi

Per dimensionare correttamente la produzione di idrogeno tramite elettrolisi, si considera un fabbisogno massimo di energia pari a 58 kWh per ogni chilogrammo di idrogeno prodotto (BoL). Questo parametro riflette la soglia energetica accettabile per ottenere idrogeno in modo efficiente, tenendo conto delle tecnologie attualmente disponibili. Per la pianificazione degli impianti di elettrolisi, il valore di 58 kWh/kg rappresenta una guida fondamentale per stimare la potenza e il consumo energetico complessivo necessario. Infatti, per ciascun megawatt di capacità installata si potrà produrre, teoricamente, circa 17.2 kg di idrogeno all'ora, assumendo un funzionamento a pieno carico. Questa valutazione consente di:

- Dimensionare le infrastrutture elettriche necessarie all'alimentazione del sistema di elettrolisi.
- Stimare il fabbisogno di energia che dovrà essere garantita attraverso fonti rinnovabili, ove possibile, per assicurare la sostenibilità dell'intero processo.

In previsione di una produzione di idrogeno su larga scala, saranno pertanto essenziali sia una disponibilità costante di energia che un'attenta gestione dei picchi di consumo.

Valutazione dell'energia e potenza necessaria al processo di liquefazione

Per produrre idrogeno liquido, l'energia teorica minima necessaria calcolata secondo il processo di Carnot è di 2.88 kWh per chilogrammo, considerando una pressione in ingresso di 20 bar. Tale pressione è facilmente raggiungibile dai moderni elettrolizzatori in pressione, come quelli alcalini e a membrana polimerica (PEM), in cui l'idrogeno esce generalmente a pressioni attorno ai 30 bar, facilitando così la successiva fase di liquefazione. Nel contesto industriale, tuttavia, i liquefattori utilizzati operano con un consumo energetico che oscilla tra i 10 e i 20 kWh per chilogrammo di idrogeno liquido prodotto, ben al di sopra del limite teorico. Questo incremento è dovuto alla complessità del raffreddamento dell'idrogeno fino a temperature criogeniche (-253°C) necessarie per mantenere il gas in fase liquida. Per le analisi e le valutazioni si consiglia di adottare un valore di riferimento di 13 kWh per chilogrammo di idrogeno, una cifra spesso utilizzata in studi di settore come benchmark per il processo di liquefazione. Tale valore bilancia le esigenze energetiche effettive del processo con i valori teorici e industriali, offrendo una stima solida per pianificare le risorse e le infrastrutture necessarie alla liquefazione su larga scala e definire i limiti di sostenibilità dell'intero ciclo produttivo dell'idrogeno liquido. Questa ipotesi di lavoro contribuisce inoltre a comprendere il fabbisogno complessivo di energia e la fattibilità della produzione di idrogeno liquido, supportando lo sviluppo di strategie efficienti per la supply chain dell'idrogeno in aeroporti e altri grandi impianti di utilizzo.

Valutazione della "footprint" degli impianti di elettrolisi

Gli impianti di elettrolisi variano notevolmente in termini di capacità, configurazione e tecnologia utilizzata, con opzioni adattabili a diversi contesti e necessità di spazio. Le dimensioni di questi impianti dipendono sia dal tipo di elettrolizzatore utilizzato (come gli elettrolizzatori alcalini, PEM o SOEC) sia dall'applicazione specifica, che può richiedere una soluzione containerizzata per esterni oppure un sistema di elettrolizzatori installato in un edificio interno (configurazione indoor). Le soluzioni containerizzate più piccole, tipicamente per ambienti esterni, partono da una potenza di circa 1 MW e sono progettate per essere facilmente trasportabili e modulari, consentendo una rapida installazione. In alternativa, i grandi impianti per interni, spesso composti da array modulari, possono raggiungere capacità di circa 20 MW per modulo, richiedendo però un'infrastruttura edilizia dedicata per la loro installazione e funzionamento. Un altro elemento importante riguarda la pressione di uscita dell'idrogeno prodotto, che varia in funzione della tecnologia adottata. Gli elettrolizzatori in pressione, come alcuni modelli alcalini e PEM, possono fornire idrogeno a una pressione di uscita intorno ai 30 bar, agevolando così il successivo stoccaggio o trasporto. Tuttavia, alcune configurazioni, come gli elettrolizzatori alcalini o PEM atmosferici, producono idrogeno a una pressione prossima a quella atmosferica, richiedendo quindi una compressione successiva per applicazioni

che necessitano di alta pressione. Questa ampia gamma di configurazioni consente di adattare gli impianti di elettrolisi a vari tipi di infrastrutture e di rispondere con maggiore flessibilità alle esigenze energetiche e logistiche, supportando una transizione graduale e sostenibile verso una produzione di idrogeno in diversi contesti operativi.

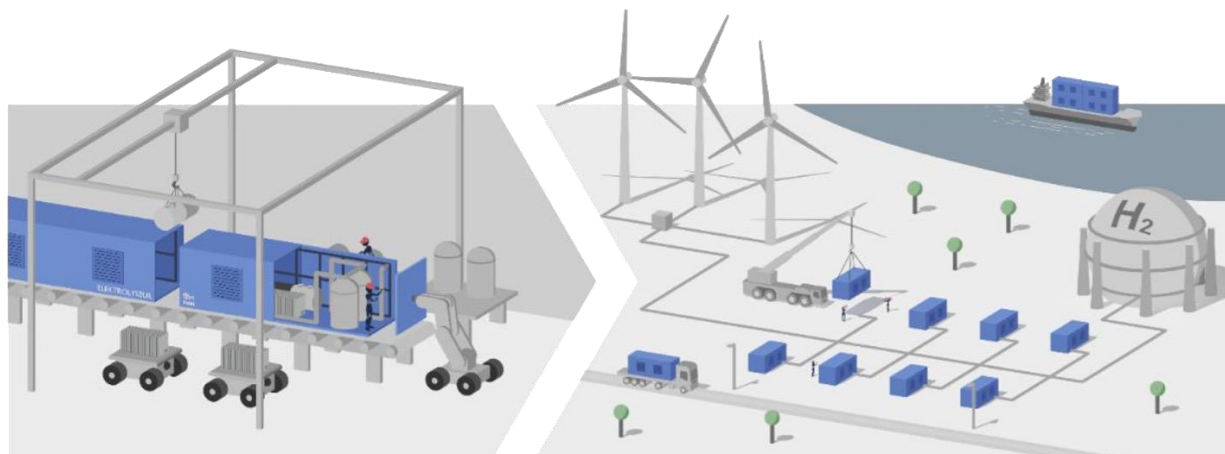


Figura 21 - Soluzioni containerizzate per la produzione di H₂

Valutazione della “footprint” degli impianti di liquefazione

Gli impianti di liquefazione dell'idrogeno richiedono un'ampia superficie e, spesso, strutture di considerevole altezza per poter ospitare le numerose apparecchiature e fasi di processo necessarie a raggiungere la temperatura estremamente bassa (-253°C) in cui l'idrogeno passa allo stato liquido. L'impatto spaziale di tali impianti è determinato dalla complessità delle operazioni di raffreddamento, compressione e stoccaggio, che richiedono una disposizione in pianta specifica e ottimizzata sia per la sicurezza operativa sia per garantire il corretto funzionamento dell'intero sistema.

I principali elementi di un impianto di liquefazione comprendono:

- Sistema di raffreddamento e compressione che comprende compressori di grande capacità e scambiatori di calore, che spesso occupano un'ampia area e richiedono un layout ben distanziato per dissipare calore in modo sicuro e per facilitare la manutenzione ordinaria e straordinaria.
- Circuiti di refrigerazione multistadio che sono progettati per gestire più livelli di raffreddamento, ciascuno dei quali contribuisce a ridurre progressivamente la temperatura dell'idrogeno. Questi circuiti richiedono apparecchiature di elevata precisione disposte in successione, aumentando l'ingombro spaziale complessivo.
- Serbatoi di stoccaggio criogenico utilizzati per conservare l'idrogeno liquido a temperature estremamente basse, sono di grandi dimensioni e richiedono spazi esterni dotati di specifiche misure di isolamento e sicurezza. L'altezza di questi serbatoi, inoltre, può risultare notevole, con configurazioni progettate per ridurre le perdite termiche e garantire una capacità adeguata.
- Sistemi di sicurezza e controllo, essendo gli impianti di liquefazione soggetti a rigorosi standard di sicurezza, data la natura altamente infiammabile dell'idrogeno, sono necessari impianti di monitoraggio e sistemi di sicurezza aggiuntivi, che spesso occupano spazio e richiedono una disposizione strategica attorno alle principali aree operative.
- Spazi di accesso e manutenzione ampi per permettere interventi in sicurezza e per l'accesso del personale e la movimentazione delle apparecchiature durante le operazioni di manutenzione.

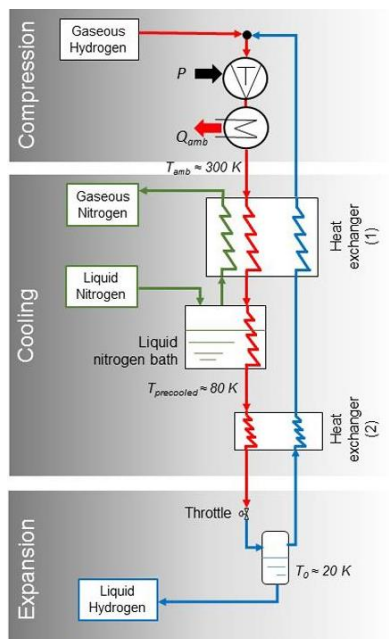


Figura 22 - Schema di processo Liquefazione

Data la struttura e le esigenze tecniche di questi impianti, è essenziale pianificare attentamente l'allocazione delle risorse spaziali per facilitare l'integrazione sicura ed efficiente dei processi di liquefazione all'interno del contesto aeroportuale o in qualsiasi sito di produzione. Considerando l'impatto della footprint e l'altezza variabile delle strutture, l'installazione di impianti di liquefazione richiede non solo un'analisi dettagliata dello spazio disponibile ma anche una verifica di conformità con i vincoli strutturali e normativi dell'area ospitante, per garantire una configurazione sostenibile e sicura.

Nel presente lavoro sono stati stimati i requisiti di spazio, proiettati al 2040, necessari per ospitare un liquefattore per aeroporti piccoli, medi e grandi, a partire dal documento Aerospace Technology Institute – FlyZero - Hydrogen Infrastructure and Operations e dalle stime di consumo di idrogeno liquido forniti da precedenti studi di Airbus.

Sulla base delle attuali previsioni²¹, il consumo di idrogeno liquido al 2040 è stimato intorno a 3.000 tonnellate all'anno, equivalente a circa 0.1 milioni di litri di LH₂ al giorno. Per soddisfare questa domanda, la superficie destinata agli impianti di stoccaggio e gestione dell'idrogeno varierà sensibilmente in funzione della dimensione dell'aeroporto: si stima una footprint di circa 2.000 m² per aeroporti di piccole dimensioni, 3.000 m² per aeroporti di medie dimensioni e fino a 4.000 m² per aeroporti di grandi dimensioni,

Queste superfici tenderanno a crescere in modo significativo nel tempo. Entro il 2046, la domanda di spazio per il trattamento e la liquefazione dell'idrogeno divergerà ulteriormente: per aeroporti di piccole dimensioni si arriverà a circa 6.500 m², mentre per quelli di grandi dimensioni la superficie necessaria potrebbe raggiungere i 13.000 m². Proiettandosi al 2050, si prevede un raddoppio delle esigenze di spazio, fino a raggiungere circa 15.000 m² per aeroporti minori e ben 30.000 m² per i principali aeroporti.

Queste cifre evidenziano come ciascun aeroporto debba pianificare ampie aree per la liquefazione e gestione dell'idrogeno, con un impatto notevole in termini di utilizzo del territorio: per un aeroporto di grandi dimensioni,

²¹ Fonte SEA Aeroporti di Milano

una footprint di 30.000 m² equivale a circa tre campi da calcio, delineando così un'esigenza spaziale che impatterà sensibilmente sia sulla progettazione delle infrastrutture aeroportuali sia sui vincoli di sicurezza e gestione operativa.

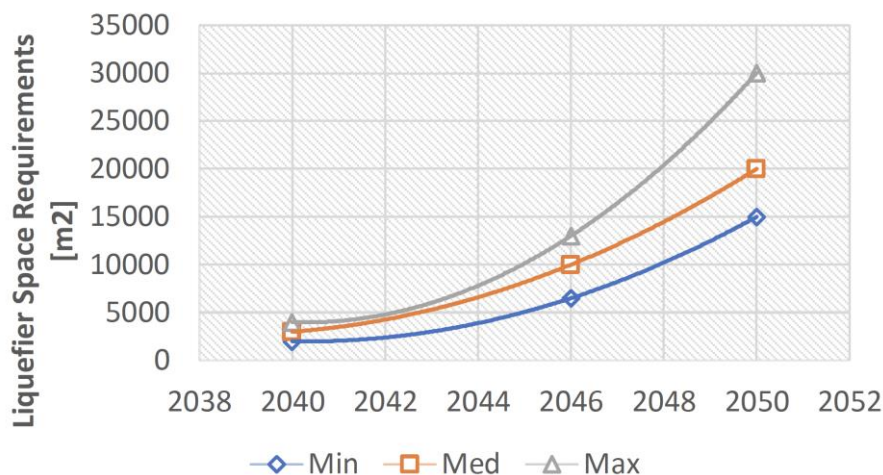


Figura 23 - Andamento della footprint di un liquefattore al variare dell'orizzonte temporale per piccoli, medi e grandi aeroporti

Nella Figura 24 è riportato un esempio di impianto con una capacità produttiva di 30 tonnellate di idrogeno liquido al giorno, completo di sfere di stoccaggio Horton necessarie per mantenere adeguate riserve di H₂. Un singolo impianto di questo tipo risulterebbe sufficiente a coprire il fabbisogno stimato per il 2045. Tuttavia, proiettando al 2050, per soddisfare la domanda complessiva di idrogeno per circa 85 voli giornalieri in partenza, sarebbero necessari tre impianti di pari capacità operativa. Questo modello di impianto consente di valutare l'infrastruttura necessaria per rispondere all'aumento della domanda, sia in termini di spazio che di capacità di stoccaggio, offrendo uno scenario realistico della crescita prevista per l'idrogeno liquido in ambito aeroportuale.



Figura 24 - Impianto da 30 t/d²²

Di particolare importanza è l'altezza caratteristica dei liquefattori verticali, visibile nella Figura 25, con un'altezza media di circa 12 metri. Questa configurazione verticale è fondamentale per ottimizzare l'efficienza di alcuni processi di scambio termico, riducendo l'ingombro a terra ma richiedendo specifiche soluzioni strutturali per il sostegno e l'isolamento.

Nell'impianto devono inoltre essere previste torce e sfiati di emergenza per il rilascio controllato di idrogeno in caso di eventi di depressurizzazione o per la gestione del boil-off. Questi sfiati freddi sono fondamentali per la sicurezza operativa, garantendo il rilascio di gas in condizioni controllate e minimizzando i rischi di accumulo o rilascio non sicuro di idrogeno.

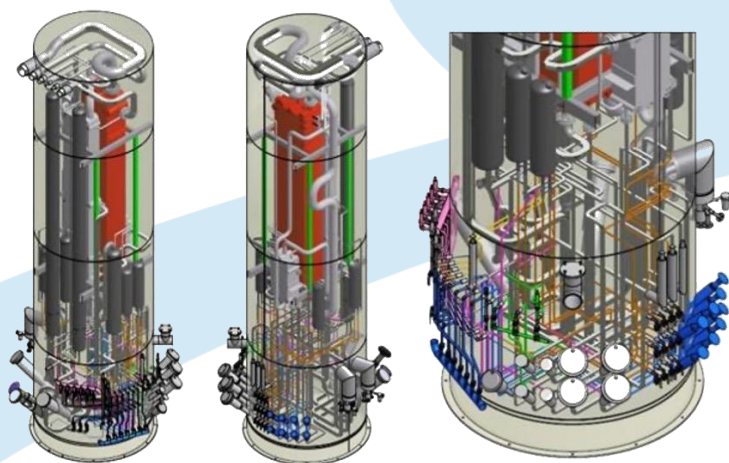


Figura 25 - 3D Model unità 10 t/d Hydrogen Liquefier Vacuum Cold Box – 3m Diametro x 12m altezza

²² Air Liquide - Hydrogen Liquefaction <https://engineering.airliquide.com/technologies/hydrogen-liquefaction>

Riassumendo quanto precedentemente esposto, per il decennio 2040-2050, si delineano le seguenti necessità per implementare sistemi ad idrogeno:

- **Acqua necessaria:** Il fabbisogno di acqua oscilla tra 8 e 80 m³/h, in funzione della scala di produzione richiesta.
- **Potenza per elettrolisi:** La potenza stimata per l'elettrolisi si colloca tra 20 e 200 MW.
- **Potenza per liquefazione:** La potenza necessaria alla liquefazione dell'idrogeno varia da 4.5 a 45 MW.
- **Potenza totale:** Considerando la somma delle potenze di elettrolisi e liquefazione, il fabbisogno complessivo raggiunge valori tra i 25 e i 250 MW.

Si rappresenta infine che, in termini di impatto sulle reti di trasmissione e distribuzione di energia elettrica, le richieste di potenza superiori ai 10 MW richiedono l'uso di impianti di alta tensione, con conseguente necessità di infrastrutture adeguate. La sottostazione elettrica, situata in prossimità dell'aeroporto, potrà richiedere uno spazio considerevole e, nel caso di tralicci, strutture con altezze notevoli, con opzioni alternative in cavo che potrebbero comportare costi elevati.

A seconda della potenza complessiva da trasportare, saranno necessarie differenti linee di tensione, ovvero 150 kV, 220 kV, o 380 kV. In particolare, il fabbisogno massimo stimato per il 2050, pari a 250 MW, implicherebbe la necessità di una linea dedicata a 220 kV, per soddisfare i requisiti di alimentazione continuativa e affidabile dell'infrastruttura aeroportuale destinata alla produzione e alla gestione dell'idrogeno.

5.3 Gestione dei rischi

La gestione dei rischi in ambito aeroportuale è cruciale per garantire la sicurezza operativa, prevenire incidenti e ottimizzare le performance. Data la natura intrinseca dell'idrogeno, che presenta elevata infiammabilità e reattività chimica, è essenziale adottare metodologie strutturate per identificare, valutare e mitigare i rischi associati alle sue applicazioni.

In linea generale, come descritto nella Linea Guida Enac 2021/001-GEN, il processo di gestione dei rischi (Safety Risk Management) è un processo logico articolato in più fasi che, partendo dall'identificazione dei pericoli (Hazard Identification) che interessano la sicurezza, arriva alla valutazione dei rischi associati a tali pericoli (Risk Assessment) ed all'individuazione delle azioni di mitigazione da adottare (Risk Mitigation).

L'applicazione del Safety Risk Management a ciascun "hazard" permette di individuare i rischi ad esso associati e definire le mitigazioni da attuare al fine di massimizzare il livello di safety in modo sostenibile.

Per le definizioni, i principi del risk management e le metodologie si può fare riferimento ai documenti ICAO: Annesso 19 e Doc 9859, alla ISO 31000 "Risk Management - Principles and guidelines" ed alla IEC/ISO 31010 che fornisce indicazioni sulle varie tecniche di identificazione dei pericoli (hazard) e sui metodi di valutazione dei rischi associati, oltre che alle Linee Guida Enac applicabili pubblicate sul sito istituzionale dell'Ente.

L'adozione di misure di sicurezza specifiche, combinata con una corretta formazione del personale e con procedure operative dettagliate, è essenziale per garantire:

- **La protezione delle persone:** evitare incidenti che potrebbero causare feriti o vittime.
- **La protezione dell'ambiente:** prevenire rilasci accidentali di idrogeno che potrebbero inquinare l'ambiente.
- **La continuità operativa:** minimizzare i tempi di fermo causati da incidenti.
- **La conformità alle normative:** garantire il rispetto delle leggi e dei regolamenti in materia di sicurezza.

La corretta gestione dei rischi per l'introduzione dell'idrogeno in aeroporto richiede un approccio integrato che, partendo dall'approfondita conoscenza di questo vettore innovativo, ne analizzi tutti i potenziali pericoli e ne consideri tutti i possibili fattori di rischio, permettendo di identificare ed implementare le idonee misure di sicurezza. Solo attraverso una gestione attenta ed integrata sarà possibile sfruttare i benefici dell'idrogeno in modo sicuro e sostenibile.

Il processo di gestione dei rischi associati all'introduzione dell'idrogeno in ambito aeroportuale deve comprendere almeno le seguenti fasi:

- a) Definizione e descrizione del contesto
- b) Identificazione degli hazard e dei rischi associati
- c) Risk assessment
- d) Definizione delle mitigazioni e valutazione del rischio residuo
- e) Monitoraggio e Risk assessment review

5.3.1 Definizione e descrizione del contesto

Al fine di una corretta identificazione dei rischi associati all'introduzione del vettore idrogeno nella catena logistica aeroportuale, è di fondamentale importanza individuare gli scenari operativi e le possibili interferenze tra i processi legati all'idrogeno (H_2) e le procedure operative dell'aeroporto. L'obiettivo è identificare ed analizzare le aree di potenziale conflitto per garantire un'integrazione sicura ed efficiente dell'idrogeno nelle operazioni, quali:

- **Sicurezza operativa:** Valutare come i processi di produzione, stoccaggio e distribuzione dell'idrogeno possano influenzare le procedure di sicurezza aeroportuale. Questo include l'analisi dei rischi associati alla manipolazione dell'idrogeno e le misure di sicurezza necessarie.
- **Logistica e movimentazione:** Analizzare l'impatto del sistema H_2 sulla logistica aeroportuale, inclusi i percorsi di movimentazione dei veicoli a idrogeno e le aree di stoccaggio.
- **Gestione delle procedure di rifornimento**
- **Procedure di emergenza:** Esaminare come le procedure di emergenza esistenti debbano essere adattate per includere scenari specifici legati all'idrogeno, come incendi o fughe di gas.
- **Efficienza operativa:** Valutare l'impatto dei processi H_2 sull'efficienza operativa complessiva dell'aeroporto, considerando possibili ritardi o interruzioni.
- **Interazione con altri sistemi:** Esaminare come i processi H_2 interagiscono con altri sistemi aeroportuali, come i sistemi di gestione del traffico aereo e i servizi di terra.

Secondo il punto norma EASA GM1 ADR.OR.B.040(f), un Safety Assessment a supporto di una modifica in ambito aeroportuale, dovrebbe specificare (Cfr. LG-2019/003-APT):

1. l'identificazione dello scopo della modifica,
2. l'individuazione degli hazard,
3. la determinazione dei criteri di safety applicabili alla modifica,
4. l'analisi del rischio (in relazione agli effetti pericolosi o ai benefici introdotti dalla modifica),
5. la valutazione del rischio e, laddove richiesto, le relative mitigazioni,
6. la verifica che la modifica sia conforme allo scopo e che rispetti i criteri di safety,

7. specifica dei requisiti di monitoraggio necessari ad assicurare che l'aeroporto e le sue operazioni continuino a soddisfare i criteri di safety dopo l'implementazione del change.

Lo scopo del safety assessment dovrebbe includere i seguenti elementi e le eventuali interazioni:

1. l'aeroporto, le sue operazioni, il management e gli aspetti di fattore umano,
2. le interfacce ed interazioni tra gli elementi oggetto di modifica ed il resto del sistema,
3. le interfacce ed interazioni tra gli elementi oggetto di modifica e l'ambiente operativo,
4. l'intero ciclo di vita della modifica dalla definizione all'operatività.

5.3.2 Proprietà fisiche dell'idrogeno e relativi pericoli intrinseci

L'idrogeno (H_2), pur essendo un elemento chimico noto, presenta sfide significative in termini di sicurezza. Tale elemento, nonostante sia più leggero dell'aria e si disperda rapidamente, presenta i seguenti elementi di rischio ²³:

- **Infiammabilità:** Le miscele di idrogeno e aria possono esplodere in presenza di una fonte di ignizione.
- **Reattività:** L'idrogeno può reagire violentemente con alcuni materiali, come l'ossigeno puro.

Al contempo la molecola H_2 presenta alcuni vantaggi che lo rendono un elemento interessante per diverse applicazioni, quali:

- **Non tossicità:** A differenza di molti altri combustibili, l'idrogeno non è nocivo per la salute umana.
- **Rapidità di dispersione:** Essendo più leggero dell'aria, l'idrogeno si disperde rapidamente in atmosfera, riducendo il rischio di accumulo in ambienti confinati.

Al fine di individuare i possibili rischi associati alle caratteristiche intrinseche dell'idrogeno, il seguente approfondimento si concentrerà su diversi aspetti della sicurezza del vettore energetico, tra cui l'infiammabilità, le perdite dai sistemi di contenimento, il comportamento durante la combustione, i rischi associati allo stato liquido e l'importanza del fattore umano.

Infiammabilità:

L'infiammabilità è il pericolo più rilevante associato all'idrogeno. Ciò si manifesta in due modi fondamentali:

- **Ampio intervallo di infiammabilità:** A differenza di altri combustibili, l'idrogeno può incendiarsi anche con una concentrazione nell'aria che varia tra il 4% e il 75%. Questo ampio intervallo significa che è più difficile mantenere una miscela al di fuori della zona di rischio. (fonte: h2tools.org, 2022).
- **Facilità di accensione:** Una miscela aria-idrogeno in condizioni ottimali di combustione può essere innescata da sorgenti di energia piccolissime, appena 0.02 mJ. Questo valore è di un ordine di grandezza inferiore all'energia necessaria per accendere altri combustibili²⁴.

Di conseguenza la strategia principale per la sicurezza si basa su due principi fondamentali:

1. **Separazione dall'ossidante:** Mantenere l'idrogeno lontano da elementi comburenti, come l'ossigeno presente nell'aria. Questo obiettivo viene raggiunto attraverso una progettazione accurata (impianti, installazione e manutenzione) per minimizzare le perdite di idrogeno, e una adeguata ventilazione che diluisca eventuali fughe al di sotto del limite inferiore di infiammabilità (LEL- **Lower Explosion Limit** ²⁵).
2. **Limite inferiore di infiammabilità (LEL) più alto:** Fortunatamente, come mostrato nella Figura 26, il LEL dell'idrogeno è superiore a quello di altri combustibili comuni, come propano e benzina. Ma a basse concentrazioni di idrogeno nell'aria, l'energia richiesta per avviare la combustione è simile a quella di altri combustibili.

²³ Fonte: Hazards Identification and Risk Management of Hydrogen Production and Storage Installations <https://www.cetjournal.it/index.php/cet/article/view/CET2296033>

²⁴ Fonte: Hydrogen Tools – Best Practices <https://h2tools.org/bestpractices/gaseous-gh2-and-liquid-h2-fueling-stations/hydrogen-compared-to-other-fuels>

²⁵ Il LEL rappresenta la concentrazione minima di un gas o di un vapore in un'atmosfera (solitamente aria) al di sotto della quale una miscela non può essere infiammata da una fonte di accensione. In altre parole, è la concentrazione più bassa di un combustibile in un'atmosfera che, in presenza di una fonte di ignizione, può dar luogo a una combustione.

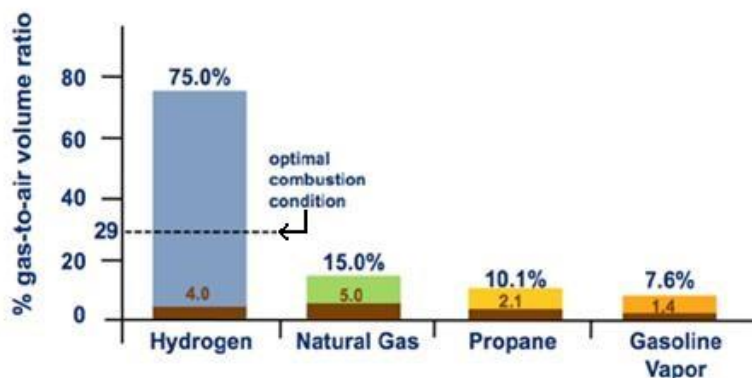


Figura 26 - Flammability Range²⁶

Perdite di Idrogeno da sistemi chiusi (serbatoi e tubazioni):

Le perdite di idrogeno sono più facili da gestire rispetto ad altri gas, di fatti tale vettore energetico presenta il vantaggio di disperdersi rapidamente, limitando i rischi di esplosione. Tuttavia, è fondamentale progettare e gestire i sistemi ad idrogeno in modo specifico, tenendo conto delle sue caratteristiche particolari.

- **Maggiore permeabilità:** L'idrogeno, grazie alle sue piccole molecole, tende a fuoriuscire più facilmente da tubazioni e giunti rispetto ad altri gas ²⁷
- **Influenza della pressione:** A pressioni più elevate, le perdite di idrogeno aumentano in modo significativo rispetto ad altri gas come il metano o l'aria ²⁸
- **Necessità di sistemi specifici:** Per quanto indicato ai punti precedenti i sistemi progettati per contenere altri gas potrebbero non essere completamente a tenuta per l'idrogeno.
- **Rapida dispersione:** Nonostante le perdite, l'idrogeno si disperde nell'ambiente molto velocemente, riducendo il rischio di accumulo pericoloso.

Comportamento dell'idrogeno in combustione:

Occorre inoltre tenere conto dei rischi specifici legati alla sua alta reattività e alla difficoltà di rilevazione delle fiamme. L'idrogeno, quando entra in combustione, presenta caratteristiche che lo rendono particolarmente pericoloso:

- **Veloce propagazione della fiamma:** La combustione dell'idrogeno è molto rapida, rendendo difficile il controllo e l'estinzione degli incendi.
- **Temperature elevate:** Le fiamme dell'idrogeno raggiungono temperature estremamente alte.
- **Invisibilità delle fiamme:** In molte condizioni, le fiamme dell'idrogeno sono difficili da vedere, ritardando così l'intervento in caso di incendio.
- **Rischio di esplosioni:** L'accumulo di idrogeno in spazi confinati può portare a esplosioni.

²⁶ Fonte: <https://h2tools.org/bestpractices/gaseous-gh2-and-liquid-h2-fueling-stations/hydrogen-compared-to-other-fuels>

²⁷ Mejia, Alejandra Hormaza, Jacob Brouwer, and Michael Mac Kinnon. "Hydrogen leaks at the same rate as natural gas in typical low-pressure gas infrastructure." *International Journal of Hydrogen Energy*

²⁸ Baird, Austin R., Austin M. Glover, and Brian D. Ehrhart. *Review of Release Behavior of Hydrogen & Natural Gas Blends from Pipelines*. No. SAND2021-9802. Sandia National Lab. (SNL-NM), Albuquerque, NM (United States), 2021

Pericoli dell'idrogeno allo stato liquido:

L'idrogeno liquefatto presenta rischi specifici legati alla sua natura criogenica e alle sue proprietà fisiche:

- **Rischi Criogenici:**
 - **Ustioni da freddo:** Il contatto diretto con l'idrogeno liquido può causare ustioni da freddo a causa delle temperature estremamente basse.
 - **Formazione di ghiaccio:** Le basse temperature possono portare alla formazione di ghiaccio sulle superfici, ostruendo valvole e sfiati.
- **Rischi di esplosione:**
 - **Miscela esplosiva:** L'evaporazione continua dell'idrogeno liquido e la possibile presenza di aria intrappolata possono creare miscele aria-idrogeno altamente esplosive.
 - **Accumulo di idrogeno:** L'idrogeno gassoso, essendo più leggero dell'aria, tende a salire e accumularsi nelle parti alte di un ambiente chiuso, aumentando il rischio di esplosione.
- **Rischi per la salute:**
 - **Asfissia:** L'idrogeno è inodore e incolore e può spostare rapidamente l'ossigeno in un ambiente confinato, causando asfissia.

Altri rischi:

- **Danni alle apparecchiature:** Le basse temperature possono danneggiare materiali e componenti non progettati per resistere a tali condizioni.
- **Danni ambientali:** In caso di fuoriuscita, l'idrogeno liquido può causare danni all'ambiente e contaminare il suolo e le acque.

Il fattore umano nella sicurezza dell'idrogeno:

il fattore umano gioca un ruolo fondamentale nella prevenzione degli incidenti legati all'idrogeno. Una corretta formazione e una cultura della sicurezza sono essenziali per garantire la protezione delle persone e degli impianti. Per tanto si evidenzia come la mancanza di conoscenza e di consapevolezza dei rischi legati all'idrogeno possa portare a incidenti.

Per garantire la sicurezza negli impianti che utilizzano questo gas, è fondamentale:

- **Formazione:** Fornire una formazione adeguata a tutti i lavoratori.
- **SOP:** Sviluppare procedure operative standard (SOP - Standard Operating Procedure) specifiche per la gestione dell'idrogeno.
- **Ispezioni:** Effettuare regolarmente ispezioni e verifiche degli impianti.
- **Cultura della sicurezza:** Promuovere una cultura della sicurezza all'interno dell'organizzazione.

5.3.3 Risk assessment

In ambito aeroportuale il Safety Risk Assessment costituisce una parte fondamentale del Safety Management System (SMS), in quanto consente di valutare e monitorare nel tempo i rischi tramite una metodologia standardizzata, utile a adottare decisioni atte ad incrementare il livello di safety sulla base di evidenze documentabili.

Per le analisi si consiglia l'implementazione di un sistema di identificazione univoca per ogni componente di una stazione di energia a idrogeno, assegnando ad ogni elemento – dal serbatoio alle più piccole valvole – un codice alfanumerico unico che ne facilita il tracciamento e la gestione.

Questa metodologia, oltre a conferire un ordine e una chiarezza ineccepibili all'intero sistema, si rivela cruciale per diverse ragioni. Innanzitutto, permette di condurre analisi di rischio estremamente accurate e mirate. Identificando con precisione ogni componente, è possibile valutare le sue specifiche vulnerabilità e le potenziali conseguenze di un malfunzionamento. In questo modo, si possono mettere in atto misure di sicurezza calibrate sulle esigenze di ogni singolo elemento.

La creazione di una struttura gerarchica, che collega tra loro i vari componenti in base alle loro funzioni e alle loro interazioni, completa il quadro. Questa rappresentazione visiva consente di comprendere a colpo d'occhio le relazioni esistenti tra i diversi elementi del sistema e di individuare eventuali colli di bottiglia o dipendenze critiche.

Ad esempio, si può creare una tabella con l'identificazione di un codice sistema, elemento e relativa descrizione. Di seguito una semplice rappresentazione esplicativa:

Tabella 5 - Esempio tabella con l'identificazione di un codice sistema, elemento e relativa descrizione

Codice Sistema	Codice Elemento	Descrizione
1.1 PVS	1.1.1 M	Misuratore di corrente
	1.1.2 M	Misuratore di tensione
1.2 ELZ	1.2.1 H	Elettrolizzatore alcalino
	1.2.2 P	Misuratore di purezza dell'idrogeno
	1.2.3 EV	Valvola elettrica
1.3 WT	1.3.1 WL	Controllo livello acqua
	1.3.2 EV	Valvola elettrica
...	...	...

Le metodologie adottabili sono molteplici, e ciascuna offre un approccio specifico all'analisi dei rischi. Di seguito si rappresentano le più comuni:

- **HAZOP (Hazard and Operability Study):** Questa metodologia si concentra sull'identificazione delle possibili deviazioni dalle condizioni di progetto e sulle loro conseguenze. È particolarmente utile per individuare i pericoli legati alle operazioni e all'interazione tra i vari componenti del sistema.
- **FMECA (Failure Modes and Effects Criticality Analysis):** La FMECA è una tecnica che prevede l'analisi dettagliata di ogni componente del sistema, individuando le possibili modalità di guasto, gli effetti e la loro criticità. Questa metodologia permette di stimare la probabilità di occorrenza di ciascun guasto e di classificarne la gravità in base alle conseguenze, permettendo di calcolare un **indice numerico di criticità** per ogni modalità di guasto, per prioritizzare le azioni correttive.
- **FMEA (Failure Mode and Effects Analysis):** Si concentra sull'identificazione dei possibili modi di guasto di un prodotto, processo o sistema, e sulle loro conseguenze. È un'analisi **qualitativa**, che mira a comprendere la natura dei guasti e i loro effetti senza attribuire loro un valore numerico.

Queste analisi possono essere utilizzate per:

- **Identificare i punti deboli del sistema:** Ad esempio, una valvola difettosa, una perdita in un tubo o un malfunzionamento di un sensore potrebbero innescare una serie di eventi pericolosi.
- **Valutare la gravità dei potenziali incidenti:** Un'esplosione di idrogeno potrebbe causare danni ingenti alle strutture, ferire il personale e inquinare l'ambiente.
- **Priorizzare le azioni di mitigazione:** Sulla base dei risultati delle analisi, è possibile definire un piano di sicurezza che preveda misure come la duplicazione dei componenti critici, l'installazione di sistemi di rilevamento gas, la formazione del personale e l'elaborazione di procedure di emergenza.

Lo scopo delle analisi è comunque quello di rappresentare gli scenari di rischio ed individuare le opportune misure di mitigative.

I criteri di safety utilizzati dovrebbero essere definiti in accordo alle pertinenti procedure di change management incluse nel Manuale di Aeroporto e dovrebbero - per quanto possibile in funzione della disponibilità di dati - fare riferimento a livelli di rischio espliciti e quantitativi, standard riconosciuti, a codici di condotta, o alla performance di safety del sistema esistente o sistemi simili. Il Safety Assessment dovrebbe essere sviluppato utilizzando le metodologie raccomandate dalla normativa nazionale ed internazionale sul Safety Management System (SMS), con particolare riferimento al Doc ICAO 9859 3^a ed luglio 2013, già peraltro adottate nelle procedure di risk management dei Safety Management System dei Gestori; a titolo di esempio, si riportano comunque di seguito le tabelle per la valutazione della severità, della probabilità di occorrenza e la matrice di rischio tratte dal suddetto Doc ICAO, nonché un esempio di matrice di tollerabilità.

Tabella 6 - Tabella di valutazione della Probabilità (fonte: ICAO Doc 9859)

<i>Likelihood</i>	<i>Meaning</i>	<i>Value</i>
Frequent	Likely to occur many times (has occurred frequently)	5
Occasional	Likely to occur sometimes (has occurred infrequently)	4
Remote	Unlikely to occur, but possible (has occurred rarely)	3
Improbable	Very unlikely to occur (not known to have occurred)	2
Extremely improbable	Almost inconceivable that the event will occur	1

Tabella 7 - Tabella di valutazione della Severità (fonte: ICAO Doc 9859)

<i>Severity</i>	<i>Meaning</i>	<i>Value</i>
Catastrophic	— Equipment destroyed — Multiple deaths	A
Hazardous	— A large reduction in safety margins, physical distress or a workload such that the operators cannot be relied upon to perform their tasks accurately or completely — Serious injury — Major equipment damage	B
Major	— A significant reduction in safety margins, a reduction in the ability of the operators to cope with adverse operating conditions as a result of an increase in workload or as a result of conditions impairing their efficiency — Serious incident — Injury to persons	C
Minor	— Nuisance — Operating limitations — Use of emergency procedures — Minor incident	D
Negligible	— Few consequences	E

Tabella 8 - Matrice di valutazione del Rischio (fonte: ICAO Doc 9859)

Risk probability	Risk severity				
	Catastrophic A	Hazardous B	Major C	Minor D	Negligible E
Frequent 5	5A	5B	5C	5D	5E
Occasional 4	4A	4B	4C	4D	4E
Remote 3	3A	3B	3C	3D	3E
Improbable 2	2A	2B	2C	2D	2E
Extremely improbable 1	1A	1B	1C	1D	1E

Tabella 9 - Esempio di matrice di Tollerabilità

Tollerabilità	Indice di valutazione del rischio	Criterio di accettabilità del rischio
NON TOLLERABILE	5A, 5B, 5C 4A, 4B, 3A	Inaccettabile nelle circostanze esistenti: la probabilità e/o la severità delle conseguenze dell'evento è intollerabile. Le attività non possono essere intraprese o proseguite senza interventi di mitigazione che riconducano il rischio (in termini di probabilità e severità) nella zona gialla o verde.
TOLLERABILE	5D, 5E, 4C, 4D, 4E, 3B, 3C, 3D, 2A, 2B, 2C, 1A	Accettabile in ragione della mitigazione del rischio: devono essere ricercate misure per mitigare il rischio al livello più basso ragionevolmente possibile (ALARP). L'accettabilità del rischio residuale dopo la mitigazione può richiedere l'intervento decisionale dell'appropriato livello decisionale dell'Ente
ACCETTABILE	3E, 2D, 2E, 1B, 1C, 1D, 1E	Accettabile: la conseguenza è così improbabile o non abbastanza grave da essere preoccupante; il rischio è accettabile. Tuttavia, è consigliabile la riduzione ulteriore del rischio al livello più basso ragionevolmente praticabile, al fine di minimizzare il rischio di un incidente o inconveniente.

Si evidenzia infine che, ai sensi del punto norma EASA ADR.OR.B.040, nei casi in cui la modifica abbia impatto su altre organizzazioni - ovvero quando la modifica sia proposta congiuntamente ad altri soggetti - il Gestore è tenuto a pianificare e sviluppare il safety assessment in coordinamento con tali organizzazioni, condividendo con le stesse sia i presupposti delle analisi sia le eventuali mitigazioni da adottare al fine di assicurare una valutazione globale dell'impatto della modifica.

5.3.4 Risk Assessment Template

Un template per la valutazione dei rischi deve fornire una struttura completa e flessibile per analizzare sistematicamente i pericoli associati a un'attività o processo. Ad esempio, la struttura proposta nella linea guida Enac LG-2019/003-APT²⁹, include sezioni dedicate all'identificazione dei rischi, alla loro valutazione, alla definizione di misure di mitigazione e alla comunicazione dei risultati.

Questa struttura modulare permette di adattare il template a contesti e complessità diverse.

5.3.5 Azioni di mitigazione

L'elevata infiammabilità e la reattività dell'idrogeno richiedono l'implementazione di misure di sicurezza specifiche per mitigare i rischi associati. Le strategie principali si concentrano sulla prevenzione delle perdite, sul controllo delle concentrazioni di idrogeno, sulla gestione delle fonti di ignizione e sulla formazione del personale. Di seguito si rappresenta una lista non esaustiva delle principali azioni da adottare, le stesse dovranno essere scelte sulla base della tipologia di impianto da realizzare.

Progettazione e Costruzione degli Impianti:

- **Materiali e componenti:** Utilizzare materiali inerti e resistenti alla corrosione dell'idrogeno.
- **Giunzioni:** riduzione del numero di giunti e raccordi flangiati, con la scelta corretta dei materiali e giunzioni adatte per l'idrogeno.
- **Ventilazione:** La progettazione di sistemi di ventilazione efficaci è cruciale per la sicurezza negli ambienti in cui è presente idrogeno. Un ricambio d'aria continuo, garantito da un'adeguata portata d'aria e da una corretta distribuzione dell'aria stessa, permette di mantenere le concentrazioni di idrogeno costantemente al di sotto del limite inferiore di esplosività (LEL). In caso di rilascio accidentale di idrogeno, una ventilazione ben progettata assicura una rapida diluizione del gas, evitando la formazione di miscele infiammabili. Ad esempio, la posizione strategica degli estrattori e l'analisi computazionale fluidodinamica (CFD³⁰) sono strumenti utili per ottimizzare le prestazioni del sistema di ventilazione.
- **Rilevamento perdite:** Installare sistemi di rilevamento perdite continui, dotati di allarmi visivi e acustici, per individuare tempestivamente eventuali fughe.
- **Zoning:** Suddividere l'impianto in zone a diversa classificazione ATEX, in base al rischio di formazione di atmosfere esplosive, e adottare le misure di protezione appropriate per ciascuna zona.
- **Ubicazione dell'impianto di produzione e stoccaggio:** dell'impianto in base ai risultati di una valutazione del rischio, ad esempio installazione di apparecchiature ad alto inventario in aree esterne.

Gestione delle Operazioni:

- **Procedure Operative Standard (SOP):** Definire procedure dettagliate per tutte le operazioni che coinvolgono l'idrogeno, dalla produzione allo stoccaggio, trasporto e manutenzione. È essenziale poi stabilire le routine di inertizzazione delle apparecchiature prima dell'avvio e delle operazioni di manutenzione. L'inertizzazione deve essere attuata seguendo procedure rigorose e monitorata

²⁹ Si veda LG-2019/003-APT §5.1 – LINEE GUIDA PER LA GESTIONE DELLE MODIFICHE NELL'AMBITO DELLA SORVEGLIANZA DELLA CERTIFICAZIONE DI AEROPORTO AI SENSI DEL REGOLAMENTO (UE) 139/2014 Ed. n. 1 del 25 novembre 2019

³⁰ CFD Computational Fluid Dynamics - analisi computazionale fluidodinamica: tecnica di simulazione numerica che permette di studiare e analizzare il comportamento dei fluidi (liquidi e gas) all'interno di sistemi complessi

costantemente tramite sistemi di rilevamento gas. In caso di emergenza, è fondamentale intervenire rapidamente per bloccare le operazioni e ripristinare le condizioni di sicurezza.

- **Formazione del Personale:** Assicurare una formazione continua del personale sulle procedure di sicurezza, sui rischi specifici dell'idrogeno e sull'utilizzo corretto delle attrezzature.
- **Permessi al Lavoro:** Implementare una procedura di permessi al lavoro per autorizzare le operazioni che comportano rischi specifici, come lavori a caldo o interventi su apparecchiature sotto pressione.
- **Ispezioni e Manutenzioni:** Eseguire ispezioni regolari dell'impianto per individuare e correggere eventuali anomalie o deterioramenti.
- **Emergenze:** Definire piani di emergenza dettagliati e organizzare esercitazioni periodiche per verificare l'efficacia delle procedure.

Controllo delle Fonti di Ignizione:

- **Eliminazione:** Rimuovere o isolare tutte le possibili fonti di ignizione dalle aree in cui è presente idrogeno (scintille, superfici calde, apparecchiature elettriche non ATEX).
- **Protezione:** Utilizzare strumenti a prova di esplosione e sistemi di protezione contro le scariche elettrostatiche.
- **Materiali:** Evitare l'utilizzo di materiali che possono generare scintille per attrito o impatto.

Monitoraggio Continuo dell'Atmosfera:

- **Sensori fissi:** Installare sensori fissi per il rilevamento continuo della concentrazione di idrogeno in punti strategici dell'impianto. (ad esempio: concentrazione gas, temperatura e pressione)
- **Rilevatori portatili:** Utilizzare rilevatori portatili per controllare l'atmosfera prima di accedere a spazi confinati o eseguire lavori in zone a rischio.

Altre Considerazioni:

- **Stoccaggio:** L'idrogeno deve essere stoccato in serbatoi progettati specificamente per questo scopo, in aree ben ventilate e lontane da fonti di calore e di ignizione.
- **Trasporto:** Il trasporto di idrogeno richiede l'utilizzo di veicoli e contenitori appositamente progettati e conformi alle normative vigenti.
- **Interazione con altri materiali:** L'idrogeno può reagire con alcuni materiali, formando composti pericolosi. È quindi fondamentale selezionare i materiali giusti per le apparecchiature e i componenti dell'impianto.

Comunicazione della Sicurezza:

- **Formazione:** Organizzare corsi di formazione specifici per tutti i dipendenti coinvolti nella gestione dell'idrogeno.
- **Segnalazione:** Utilizzare una segnaletica chiara e visibile per indicare le zone a rischio e le precauzioni da adottare.
- **Comunicazione interna:** Diffondere informazioni e aggiornamenti sulla sicurezza attraverso newsletter, riunioni e altri canali di comunicazione.

Sistemi di sicurezza strumentati:

La natura inodore, incolore e insapore dell'idrogeno rende estremamente difficile rilevarne le perdite con i sensi umani, richiedendo l'utilizzo di strumenti specifici in grado di prevenire e rilevare gli scenari pericolosi.

I **dispositivi di sicurezza** svolgono un ruolo cruciale nella gestione dei rischi legati all'idrogeno. Essi sono progettati per:

- Prevenire incidenti: rilevando tempestivamente condizioni anomale (come sovrappressioni o incendi) e attivando contromisure automatiche.
- Mitigare gli effetti di un incidente: limitando la propagazione di fiamme, contenendo le esplosioni e proteggendo le persone e le attrezzature.
- Garantire la continuità operativa: permettendo di intervenire rapidamente in caso di emergenza e di ripristinare le condizioni di sicurezza.

Tipi di dispositivi di sicurezza:

Oltre ad apparati già largamente impiegati nell'ambito della prevenzione incendi (quali ad esempio dischi di rottura, ventole di esplosione, rilevatori di fiamma a infrarossi), esistono dispositivi di sicurezza specificamente progettati per l'impiego dell'idrogeno, tra cui:

- Valvole di sicurezza: per rilasciare l'eccesso di pressione in modo controllato.
- Sistemi di spegnimento incendi: per estinguere rapidamente le fiamme.
- Sistemi di ventilazione: per disperdere eventuali miscele esplosive.
- Sistemi di allarme: per avvisare il personale in caso di pericolo.
- Sistemi integrati di sicurezza: soluzioni tecnologiche per il rilevamento precoce di fughe di idrogeno e l'attivazione immediata di misure di emergenza, come l'arresto automatico dei processi e l'isolamento dell'area.

5.3.6 Monitoraggio e Risk assessment review

Trattandosi di una tecnologia innovativa è importante che il Gestore aeroportuale inserisca tutti gli hazard identificati nel Registro dei pericoli (Hazard Log) ed esegua un monitoraggio periodico degli stessi al fine di valutare l'effettiva presenza dei rischi associati, l'efficacia delle misure di mitigazione implementate e la necessità di eventuali rivalutazioni dei rischi (Risk assesment review).

Si ritiene pertanto opportuno aggiornare l'hazard log (ADR.OR.D.005 (b)(3)) inserendo i sistemi e/o gli impianti come hazard, associandone la valutazione del rischio e monitorando nel tempo gli eventuali Safety Performance Indicator (SPI) associati. Per aeroporti di dimensioni minori, non rientranti nella normativa EASA e/o RCEA, si suggerisce comunque di istituire e mantenere costantemente aggiornato un Registro dei pericoli (Hazard log).

6 Sviluppo e presentazione dei progetti

Nel presente capitolo vengono esplicitati i contenuti essenziali che devono caratterizzare le progettazioni finalizzate all'introduzione del vettore energetico idrogeno nella catena logistica aeroportuale. Le progettazioni da presentare ad Enac per l'approvazione ai sensi del Codice della Navigazione, sviluppate in conformità con il vigente Codice dei Contratti Pubblici, dovranno essere preventivamente valutate, con esito positivo, anche dal Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco per gli aspetti di competenza.

Rispondenza agli strumenti di pianificazione e programmazione

I progetti di implementazione di soluzioni tecnologiche per l'introduzione del vettore energetico idrogeno nella catena logistica aeroportuale dovranno essere inquadrati all'interno degli strumenti di pianificazione e programmazione aeroportuale vigenti, quindi inseriti nei Contratti di Programma stipulati tra i Gestori aeroportuali nazionali ed Enac.

Analisi degli obiettivi e dei fabbisogni

Il Gestore aeroportuale, all'interno dei progetti che presenterà ad Enac, dovrà esplicitare con chiarezza il legame tra le iniziative proposte e gli obiettivi strategici di sviluppo dello scalo. A tal proposito, sarà necessario che alla base delle progettazioni sviluppate vi sia una specifica analisi dei fabbisogni energetici in termini di benefici e costi nel breve, medio e lungo termine. Tale analisi dovrà mostrare chiaramente come l'implementazione di impianti ad idrogeno si inserisca all'interno di un complessivo piano di sviluppo energetico dello scalo.

Nel suddetto studio dovrà essere sviluppata un'analisi di specifici KPI, orientata a fornire una panoramica in termini di riduzione delle emissioni di CO₂ nello scalo aeroportuale a seguito dell'implementazione di impianti ad idrogeno.

I KPI dovranno quindi essere contestualizzati in relazione agli obiettivi di decarbonizzazione e sostenibilità energetica dell'aeroporto con riferimento a specifici orizzonti temporali di analisi.

Per lo studio dei fabbisogni alla base delle progettazioni viene fornito, come supporto e base di partenza, l'Allegato 1 alle presenti Linee Guida, sviluppato sulla base delle risultanze del progetto SAVES.

Analisi di ottemperanza alle prescrizioni impartite dal Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco

Attualmente, nel panorama legislativo nazionale, il parere del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco risulta vincolante per l'implementazione di soluzioni progettuali riguardanti la realizzazione di impianti ad idrogeno. Il parere di merito viene fornito principalmente ai sensi del D.M. 23/10/2018 "Regola tecnica di prevenzione incendi per la progettazione, costruzione ed esercizio degli impianti di distribuzione di idrogeno per autotrazione" e del D.M. 07/07/2023 "Impianti di produzione di idrogeno mediante elettrolisi e relativi sistemi di stoccaggio".

La progettazione sottoposta ad Enac per approvazione dovrà aver acquisito il parere di competenza dei Vigili del Fuoco ed in sede di istruttoria si provvederà ad accertare la compatibilità tra le soluzioni scelte per ottemperare alle prescrizioni impartite e gli standard Enac di safety aeroportuale.

Ulteriori riferimenti normativi

I progetti presentati dovranno anche rappresentare la successiva fase operativa, ovvero illustrare la rispondenza alle disposizioni del D.Lgs. n. 81 del 09 aprile 2008 “Attuazione dell’articolo 1 della legge 03 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro” che regolamentano la materia della tutela della salute e della sicurezza dei lavoratori nei luoghi di lavoro, alla Direttiva ATEX 1999/92/CE che definisce i requisiti minimi in materia di salute e sicurezza dei luoghi di lavoro con presenza di atmosfere potenzialmente esplosive ed alla Direttiva ATEX 2014/34/UE relativa le responsabilità dei principali operatori economici e alle modalità di certificazione dei prodotti messi in commercio, nonché al codice di prevenzione incendi per le attività soggette a controllo da parte dei VVF.

Valutazione dei rischi e delle ricadute sull’operatività aeroportuale

Eventuali pericoli introdotti nel sistema aeroportuale con l’implementazione di impianti ad idrogeno dovranno essere trattati mediante uno specifico Risk Assessment che mostri come questi vengano mitigati e gestiti tramite specifiche procedure.

Per gli aeroporti ricadenti nell’EASA scope, nell’ambito del processo di sorveglianza della certificazione aeroportuale, la gestione delle modifiche derivanti dall’implementazione di impianti ad idrogeno dovrà essere trattata secondo le Linee Guida Enac 2019/003-APT, inquadrando il cambiamento come Change Management Prior Approval. Il Gestore dovrà pertanto procedere all’individuazione dei potenziali hazard derivanti dall’implementazione delle soluzioni tecnologiche inerenti al vettore energetico idrogeno e determinare le azioni da implementare per attuare il cambiamento garantendo il mantenimento di un adeguato livello di safety nello scalo.

Per gli aeroporti non ricadenti nell’EASA scope, quindi esclusi dall’applicabilità delle Linee Guida Enac 2019/003-APT, all’interno del progetto dovrà essere sviluppata una specifica valutazione dei rischi prendendo come riferimento le Linee Guida Enac 2019/003-APT e dovranno essere sviluppate procedure ad hoc per la mitigazione degli hazard.

Valutazioni tecniche del progetto

In sede di istruttoria Enac per l’approvazione di progetti di implementazione di soluzioni tecnologiche che prevedano l’utilizzo dell’idrogeno in ambito aeroportuale, saranno attenzionate le soluzioni tecniche adottate per la progettazione sia delle opere civili che di quelle impiantistiche.

Sarà pertanto condotta una valutazione in merito alle dotazioni infrastrutturali progettate per l’implementazione degli impianti, nonché alle soluzioni individuate per gli impianti stessi.

Accertamento delle fonti di finanziamento

All'interno dell'analisi economica dell'intervento dovrà essere chiaramente esplicitata la fonte di finanziamento che si intende utilizzare, specificando quindi se si prevede l'impiego di fondi derivanti da bandi nazionali o comunitari, fondi PNRR, oppure se si intende procedere mediante autofinanziamento con successiva remunerazione in tariffa. Ai fini di fornire una panoramica relativa alle fonti di finanziamento si rimanda alla tabella inserita nel Capitolo 7.

Istituzione di Sandbox per l'implementazione di attività legate a sfide regolamentari e tecnologiche

Il Gestore aeroportuale, per rispondere ad esigenze sperimentali legate a soluzioni tecnologiche di implementazione del vettore energetico sostenibile idrogeno, ha la possibilità di ricorrere all'utilizzo dello strumento della Sandbox.

La Sandbox rappresenta un ambiente di prova, fisico o virtuale, controllato, nel quale sperimentare, per un periodo limitato, attività legate a sfide regolamentari e tecnologiche, previa apertura di un dialogo con l'Enac. La Sandbox beneficia di una disciplina semplificata transitoria.

In termini di sfida regolamentare, la Sandbox ha l'obiettivo di colmare vuoti normativi, modificare norme o materiale interpretativo e linea guida che impediscono o comunque rendono non efficienti le attività nei vari domini del sistema dell'aviazione civile e far fronte all'assenza di standard o norme per la specifica innovazione in questione. In termini di sfida tecnologica, l'obiettivo della Sandbox è invece quello di colmare vuoti tecnologici o la mancanza di standard industriali, far fronte alla inadeguatezza degli standard industriali che impediscono la realizzazione di prodotti e servizi innovativi, soddisfare l'esigenza di valutazione di nuovi sistemi o valutare la maturità di un progetto, prodotto, tecnologia o servizio.

L'istituzione di una Sandbox consente quindi di affrontare sfide regolamentari o tecnologiche al fine di:

- a) sperimentare o validare nuovi requisiti, metodi accettabili di rispondenza e standard o modifiche degli stessi, o
- b) sviluppare nuove tecnologie, sistemi, servizi, prodotti e modelli di business.

Nell'ambito della sandbox è quindi possibile effettuare analisi d'impatto delle attività di cui ai punti a) e b), sull'ambiente esterno.

L'Istanza di istituzione Sandbox deve essere formulata e trasmessa ad Enac in accordo al "Regolamento Tecnico Sandbox Ed. 1 del 5 luglio 2024 (art. 6)" e sarà valutata da un gruppo di esperti appositamente nominato.

La sperimentazione da effettuare nella Sandbox può quindi avere ad oggetto iniziative attinenti all'innovazione tecnologica che richiedono la deroga temporanea alle norme vigenti ed in tal caso si ricorre alle misure di semplificazione amministrativa per l'innovazione di cui all'articolo 36, d. l. 16 luglio 2020, n. 76, convertito in legge 11 settembre 2020, n. 120 (c.d. Sperimentazione Italia).

7 Opportunità di Finanziamento

L'adozione dell'idrogeno negli aeroporti rappresenta una priorità strategica sia a livello europeo che nazionale, con diverse opportunità di finanziamento disponibili per supportare la transizione energetica nel settore aeroportuale. A livello europeo, programmi come il *Clean Hydrogen Partnership* e il *Connecting Europe Facility (CEF) for Transport* offrono finanziamenti per lo sviluppo di infrastrutture di rifornimento a idrogeno, soluzioni per la mobilità aeroportuale e progetti di ricerca e innovazione. Il programma *Horizon Europe* sostiene iniziative volte all'integrazione dell'idrogeno nelle operazioni aeroportuali, con particolare attenzione alla sostenibilità e alla riduzione delle emissioni. Inoltre, l'*Innovation Fund*, uno dei maggiori programmi di finanziamento per tecnologie a basse emissioni di carbonio in Europa, fornisce risorse significative per progetti su larga scala, tra cui l'uso dell'idrogeno nei trasporti e nelle infrastrutture aeroportuali.

A livello nazionale, diversi strumenti di finanziamento, tra cui i Piani Nazionali di Ripresa e Resilienza (PNRR) e fondi dedicati alla decarbonizzazione dei trasporti, offrono incentivi per l'implementazione di tecnologie a idrogeno nei principali hub aeroportuali. Inoltre, l'Italia partecipa attivamente alla *Clean Hydrogen Mission* di Mission Innovation, un'iniziativa globale volta ad accelerare la ricerca, lo sviluppo e la diffusione dell'idrogeno pulito. Questo programma favorisce investimenti e collaborazioni tra enti pubblici e privati, con l'obiettivo di rendere l'idrogeno competitivo e integrarlo nelle infrastrutture di trasporto, compresi gli aeroporti. Queste iniziative mirano a favorire la creazione di un ecosistema aeroportuale a basse emissioni, promuovendo lo sviluppo di infrastrutture, la sperimentazione di veicoli a idrogeno e la creazione di sinergie tra operatori aeroportuali, compagnie aeree e industrie dell'idrogeno.

Tra le principali iniziative di finanziamento esistenti a livello europeo e nazionale per lo sviluppo infrastrutturale dell'idrogeno, si segnalano in prospettiva di introduzione in ambito aeroportuale:

- **Clean Hydrogen Partnership** - iniziativa pubblico-privata europea che sostiene la ricerca e l'innovazione nel settore dell'idrogeno pulito. È finanziata dalla Commissione Europea, dall'industria e dal mondo della ricerca con l'obiettivo di accelerare lo sviluppo e la diffusione delle tecnologie a idrogeno e celle a combustibile, contribuendo alla decarbonizzazione di vari settori, tra cui trasporti, industria ed energia. La Clean Hydrogen Partnership promuove progetti di ricerca e sviluppo per migliorare le tecnologie legate alla produzione, allo stoccaggio, alla distribuzione e all'uso dell'idrogeno; supporta la creazione di un'infrastruttura europea per l'idrogeno, compresi hub e corridoi per il trasporto; favorisce la collaborazione tra aziende, istituzioni pubbliche e centri di ricerca per accelerare l'adozione dell'idrogeno pulito; contribuisce alla realizzazione degli obiettivi del Green Deal Europeo e della strategia UE per l'idrogeno. I temi finanziati riguardano: la produzione di idrogeno rinnovabile (tecnologie innovative per elettrolizzatori, riduzione dei costi e aumento dell'efficienza), la distribuzione e stoccaggio (infrastrutture per il trasporto e lo stoccaggio di idrogeno, comprese soluzioni per reti e pipeline), le applicazioni nei trasporti (sviluppo di veicoli e infrastrutture di rifornimento per aviazione, trasporto marittimo, ferroviario e stradale), le applicazioni industriali (uso dell'idrogeno nei settori hard-to-abate (acciaio, chimica, raffinazione)), l'integrazione con il sistema energetico.
- **Connecting Europe Facility (CEF) Alternative Fuels Infrastructure Facility** - il CEF supporta progetti infrastrutturali nei settori dei trasporti, sostenendo la diffusione di infrastrutture per l'approvvigionamento di carburanti alternativi lungo la rete transeuropea dei trasporti TEN-T. Una parte del budget è destinata a progetti che mirano a sviluppare infrastrutture per la produzione, il trasporto e la distribuzione di idrogeno verde come stazioni di rifornimento di idrogeno, infrastrutture di rifornimento di idrogeno dedicate anche

ai veicoli e alle attrezzature per gli aeroporti. La prossima scadenza per la sottomissione delle candidature è fissata per il 11 giugno 2025. Successivamente, è prevista un'ulteriore scadenza il 17 dicembre 2025.

- **Innovation Fund** - uno dei principali strumenti di finanziamento dell'Unione Europea per sostenere la transizione verso un'economia a basse emissioni di carbonio. Finanziato attraverso il sistema ETS (Emissions Trading System), il fondo ha l'obiettivo di supportare lo sviluppo e la diffusione di tecnologie innovative che contribuiscano alla decarbonizzazione dell'industria e dei trasporti, con un'attenzione particolare all'idrogeno. Nel settore dell'idrogeno, l'Innovation Fund finanzia progetti legati alla produzione di idrogeno rinnovabile e a basse emissioni, incentivando lo sviluppo di elettrolizzatori su scala industriale. Inoltre, sostiene la realizzazione di infrastrutture per il trasporto e lo stoccaggio dell'idrogeno, come pipeline e hub di distribuzione, fondamentali per la creazione di un mercato dell'idrogeno efficiente e competitivo. Il fondo promuove anche l'adozione dell'idrogeno in settori industriali difficili da decarbonizzare, come la siderurgia e la chimica, aiutando le aziende a ridurre significativamente le loro emissioni. Un altro ambito di intervento riguarda il trasporto e la mobilità, dove vengono finanziati progetti che favoriscono l'uso dell'idrogeno nell'aviazione, nel trasporto marittimo e nei mezzi pesanti. L'Innovation Fund si concentra in particolare su progetti dimostrativi su larga scala, contribuendo fino al 60% dei costi aggiuntivi rispetto alle soluzioni convenzionali. In questo modo, il fondo mira a ridurre il rischio economico per gli investitori e ad accelerare l'adozione dell'idrogeno come vettore energetico chiave per la neutralità climatica.
- La **Clean Hydrogen Mission di Mission Innovation** è un'iniziativa globale nata per accelerare la ricerca, lo sviluppo e la diffusione delle tecnologie legate all'idrogeno pulito. Lanciata nel 2021 nell'ambito della seconda fase di Mission Innovation, questa iniziativa coinvolge governi, industrie e centri di ricerca con l'obiettivo di rendere l'idrogeno rinnovabile accessibile e competitivo a livello globale entro il 2030. L'obiettivo principale della Clean Hydrogen Mission è ridurre i costi dell'idrogeno prodotto da fonti rinnovabili e potenziare le infrastrutture necessarie per la sua diffusione su larga scala. Per farlo, l'iniziativa sostiene lo sviluppo di hydrogen valleys, aree in cui la produzione, lo stoccaggio, il trasporto e l'utilizzo dell'idrogeno sono integrati per dimostrarne l'efficacia e la sostenibilità economica. Inoltre, la missione si concentra sul miglioramento delle tecnologie per l'elettrolisi, la riduzione dei costi di produzione e la creazione di modelli di business che favoriscano la competitività dell'idrogeno rispetto ai combustibili fossili. L'Italia è tra i paesi che partecipano attivamente alla Clean Hydrogen Mission, contribuendo con progetti e investimenti volti a sviluppare un ecosistema dell'idrogeno competitivo. Il supporto della missione si traduce in finanziamenti per ricerca e innovazione, collaborazioni internazionali e iniziative pilota in settori chiave come l'industria, i trasporti e l'energia.

La Tabella 10 e la Tabella 11 presentano una panoramica delle diverse opportunità di finanziamento a livello europeo, focalizzate principalmente su progetti legati all'energia e all'innovazione, indipendentemente dalla presenza di bandi attivi. Le tabelle presentano i programmi più rilevanti, i tipi di finanziamento offerti e i link utili per approfondire le informazioni. In caso di preparazione di una proposta si raccomanda di sviluppare progetti e partnership in linea con le priorità europee sull'idrogeno, in modo da essere pronti per future call e di monitorare gli annunci del Ministero delle Imprese e del Made in Italy (MIMIT), oltre a valutare l'eleggibilità delle proposte ed i bandi Horizon Europe o del Fondo per l'Innovazione, che supportano progetti nel settore dell'idrogeno.

Si rammenta che, nell'ambito dello sviluppo di opere aeroportuali (sia nel caso di infrastrutture fisse che di dimostratori o progetti pilota), l'accesso ad opportunità di finanziamento e la partecipazione a bandi nazionali ed internazionali, è subordinata a nulla osta di Enac.

Tabella 10 - Possibilità di finanziamento Parte 1

Programma	Tipi di Finanziamento	Descrizione	Link
Connecting Europe Facility - Energia	Finanziamenti (prestiti/garanzie) Sovvenzioni / Sussidi Appalti	Il Connecting Europe Facility per l'Energia (CEF-E) è uno strumento di finanziamento per investimenti infrastrutturali mirati a livello europeo. Supporta l'implementazione del regolamento sulle Reti Trans-europee per l'Energia (TEN-E), che mira a collegare le infrastrutture energetiche dei paesi dell'UE. Potrebbe finanziare progetti di trasporto e distribuzione di idrogeno transfrontaliero, stoccaggio e grandi elettrolizzatori (>100 MW di capacità).	https://ec.europa.eu/inea/en/connecting-europe-facility/cef-energy 
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale	Finanziamenti (prestiti/garanzie) Sovvenzioni / Sussidi Assistenza Tecnica (per promotori di progetti)	Il Fondo Europeo di Sviluppo Regionale (FESR) fa parte della politica di coesione dell'UE. Il FESR supporta l'innovazione e l'imprenditorialità nella transizione verso un'economia a impatto climatico neutro. REACT-EU fornisce ulteriori fondi al FESR. Alcune regioni potrebbero destinare fondi FESR a progetti di idrogeno come parte delle loro strategie energetiche pulite.	https://ec.europa.eu/regional_policy/index_en.cfm 
Horizon Europe	Finanziamenti (prestiti/garanzie) Sovvenzioni / Sussidi Appalti Assistenza Tecnica (per promotori di progetti)	Horizon Europe 2021-2027 è il principale programma di finanziamento dell'UE per la ricerca e l'innovazione. Il Pilastro II e III di Horizon Europe sono focalizzati sull'implementazione di applicazioni industriali a basse emissioni di carbonio e tecnologie innovative, incluso l'idrogeno. Deve coinvolgere l'elemento di ricerca e innovazione. La Clean Hydrogen Partnership è un'iniziativa pubblico-privata nell'ambito di Horizon Europe che mira ad accelerare lo sviluppo di un'economia dell'idrogeno pulito in Europa. Potrebbe comportare opportunità di finanziamento e collaborazione con stakeholder industriali.	https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe_en 

Clean Hydrogen Partnership	Finanziamenti (prestiti/garanzie) Sovvenzioni / Sussidi Appalti Assistenza Tecnica (per promotori di progetti)	La Clean Hydrogen Partnership è finanziata dalla Commissione Europea, dall'industria e dal mondo della ricerca con l'obiettivo di accelerare lo sviluppo e la diffusione delle tecnologie a idrogeno e celle a combustibile, contribuendo alla decarbonizzazione di vari settori, tra cui trasporti, industria ed energia.	https://www.clean-hydrogen.europa.eu/index_en 
Fondo per l'Innovazione	Finanziamenti (prestiti/garanzie) Sovvenzioni / Sussidi Assistenza Tecnica (per promotori di progetti)	Uno dei più grandi programmi di finanziamento al mondo per la dimostrazione di tecnologie innovative a basse emissioni di carbonio. Il Fondo finanzia progetti dimostrativi sulla produzione innovativa e l'uso di idrogeno a basse emissioni di carbonio e rinnovabile su scala pre-commerciale e commerciale, con l'obiettivo di portarli sul mercato. La Commissione estenderà anche le aste pilota del Fondo per l'Innovazione come piattaforma ai paesi interessati dell'EEA.	https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-funding-climate-action/innovation-fund/what-innovation-fund_en 
InvestEU	Sovvenzioni / Sussidi Non-garanzia di Finanziamento	InvestEU sostiene investimenti sostenibili, innovazione e creazione di posti di lavoro in Europa. Fornisce sovvenzioni e strumenti finanziari per progetti che promuovono la crescita economica, la coesione sociale e la competitività.	https://europa.eu/investeu/home_en 
Fondo di Modernizzazione	Sovvenzioni / Sussidi	Il Fondo di Modernizzazione è rivolto ai paesi dell'UE con un PIL pro capite inferiore al 60% della media UE. Finanzia progetti di modernizzazione del sistema energetico per migliorare l'efficienza energetica e ridurre le emissioni.	https://modernisationfund.eu/ 

Recovery and Resilience Facility	Sovvenzioni / Sussidi Prestiti	La Recovery and Resilience Facility (RRF) è il pilastro centrale del Next Generation EU. Fornisce finanziamenti per riforme e investimenti nei paesi dell'UE, mirati a far fronte alle conseguenze economiche e sociali della pandemia di COVID-19 e a costruire un'economia verde e digitale.	https://ec.europa.eu/info/business-economy-euro/recovery-coronavirus/recovery-and-resilience-facility_en 
Important Projects of Common European Interest (IPCEIs)	Sovvenzioni / Sussidi	IPCEI finanzia progetti di rilevanza strategica per l'UE che coinvolgono vari paesi membri e settori industriali. Promuove l'innovazione, la competitività e la sostenibilità a lungo termine in settori chiave come la mobilità, l'energia, la salute e la digitale.	https://ec.europa.eu/competition/state_aid/ipcei/index_en.html 

Tabella 11 - Possibilità di finanziamento Parte 2

Nome del Programma	Obiettivi	Tipi di Progetti sull'Idrogeno che Possono Essere Finanziati	Fondi Disponibili (Totali, non Esclusivamente per l'Idrogeno)	Processo di Finanziamento	Come Fare Domanda e Quando	Sinergie Dichiarate con Altri Finanziamenti
CEF-E	Supporta l'implementazione delle Reti Transeuropee per l'Energia (TEN-E)	Progetti dimostrativi, studi, costruzione e sviluppo di nuove tecnologie e infrastrutture per l'idrogeno.	€ 191 miliardi	Status Progetti di Interesse Comune (PCI) come prerequisito per il finanziamento CEF-E.	La proposta di progetto deve essere presentata dagli Stati membri o con il loro accordo. Le proposte sono valutate dalla Commissione Europea.	n/a
FESR	Aumenta la coesione nell'UE riducendo le disparità tra le regioni	Progetti di trasmissione e distribuzione dell'idrogeno possono far parte del finanziamento per il periodo 2021-2027.	n/a	Target di spesa del 30%, con focus su priorità identificate a livello nazionale e regionale. Fondi implementati dalle autorità nazionali in linea con l'approccio di gestione condivisa.	I progetti di idrogeno sono finanziati in base alle priorità identificate a livello nazionale e regionale. Fondi implementati dalle autorità nazionali in linea con l'approccio di gestione condivisa.	Condizioni di applicazione determinate dalle autorità nazionali e regionali degli Stati membri dell'UE.
Horizon Europe e Clean Hydrogen Partnership	Progetti che coinvolgono ricerca e innovazione in Europa	Pilastro II - sfide globali e competitività industriale europea. CLUSTER 5 (Clima, Energia e Mobilità): Il Partenariato per l'Idrogeno Pulito si concentra sulla produzione e stoccaggio dell'idrogeno, inclusi elettrolizzatori e tecnologie di idrogeno.	Budget totale € 95.5 miliardi, il Partenariato per l'Idrogeno Pulito ha un budget di € 1 miliardo.	La Commissione Europea fornisce finanziamenti sotto forma di sovvenzioni, premi e contratti a ricercatori eccellenti e innovatori per sviluppare la ricerca e l'innovazione.	Il Partenariato per l'Idrogeno Pulito è finanziato da Horizon 2020.	I finanziamenti condividono sinergie, cooperazione e complementarità con altri partenariati dell'UE specificati nei programmi di lavoro biennali.

Innovation Fund	Tecnologie innovative a basse emissioni di carbonio, coperto dalla Direttiva EU ETS. Non è un programma di ricerca.	Progetti di trasmissione e distribuzione dell'idrogeno possono essere finanziati se mitigano le emissioni nella produzione o nell'uso finale.	Il Fondo raccoglie entrate dalle quote di emissione dell'UE (450 milioni di quote di emissione dal 2020 al 2030). Il Fondo copre fino al 60% dei costi di capitale aggiuntivi e può essere combinato con altri finanziamenti pubblici.	Il Fondo è aperto a progetti su larga scala con CAPEX superiore a € 7.5 milioni e progetti su piccola scala con CAPEX inferiore a € 7.5 milioni.	I promotori dei progetti possono fare domanda presentando i loro progetti tramite il portale di finanziamento e offerte. Ci sono due finestre di finanziamento.	Sinergie con altri programmi e fondi dell'UE, ma devono essere specificate caso per caso.
------------------------	---	---	--	--	---	---

8 Allegati

Allegato 1 disponibile online alla pagina https://www.enac.gov.it/enac_enea_lg_saves/





www.enac.gov.it

