AIRI - ASSOCIAZIONE ITALIANA PER LA RICERCA INDUSTRIALE

LE INNOVAZIONI DEL PROSSIMO FUTURO

XI EDIZIONE 2025

TRASPORTI E MOBILITÀ





Airi
ASSOCIAZIONE ITALIANA PER LA RICERCA INDUSTRIALE
50 1974-2024

AGRA

AIRI - ASSOCIAZIONE ITALIANA PER LA RICERCA INDUSTRIALE

Airi – Associazione Italiana per la Ricerca Industriale, rappresenta da 50 anni un punto di riferimento per il sistema italiano della ricerca industriale.

Dal 1974 opera come associazione senza scopo di lucro con l'obiettivo di sostenere la ricerca, l'innovazione, lo sviluppo tecnologico e il relativo trasferimento di conoscenze e promuove un'innovazione che contemperi il valore economico, il valore ambientale e quello sociale.

Rappresenta e supporta un'ampia rete di soci tra Industrie, PMI, Enti di ricerca pubblici, Università, Organismi di ricerca e Società di consulenza, permettendo lo scambio di esperienze e di buone prassi nella ricerca industriale.

Questa significativa rappresentatività fa di Airi opinion leader e interlocutore autorevole per gli orientamenti tecnologici nelle politiche della ricerca, per l'adeguata gestione e attuazione del sostegno pubblico, e più in generale per la più ampia diffusione della cultura della ricerca industriale italiana.

www.airi.it

LE INNOVAZIONI DEL PROSSIMO FUTURO

XI EDIZIONE

UNA PUBBLICAZIONE DEL GRUPPO DI LAVORO AIRI TECNOLOGIE PRIORITARIE

TRASPORTI E MOBILITÀ

PARTE 1: PROFILO DI SETTORE
PARTE 2: SCENARI TECNOLOGICI

AIRI - ASSOCIAZIONE ITALIANA PER LA RICERCA INDUSTRIALE

LE INNOVAZIONI DEL PROSSIMO FUTURO
XI edizione Settore: Trasporti e mobilità

ISBN 978-88-98935-74-1
copyright © 2025 Airi
Associazione Italiana per la Ricerca Industriale
viale Aventino, 102 00153 Roma tel +39 068848831 e-mail info@airi.it www.airi.it

finito di stampare
nel mese di maggio 2025
Realizzazione editoriale
Airi
progetto grafico
Goodlab srl (www.goodlab.it)

Edizioni:
Agra Editrice srl, Roma (www.agraeditrice.it)

Disponibile in versione online su
www.airi.it

Attribuzione-Non Commerciale-Non Opere Derivate 4.0
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/

indice - profilo di settore

PREFAZIONE 9

INTRODUZIONE 11

MEMBRI DEL GRUPPO DI LAVORO profilo di settore 17

MEMBRI DEL GRUPPO DI LAVORO scenari tecnologici 19

INTRODUZIONE 23

IL MERCATO 25

IMPATTO SOCIOECONOMICO 33

PARADIGMI FUTURI 39

GLI SCENARI TECNOLOGICI 42

indice - scenari tecnologici

MEMBRI DEL GRUPPO DI LAVORO **19**

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO **55**

Mobilità aerea 55
Trasporto stradale 56
Trasporto marittimo 57
Trasporto ferroviaro 57
Investimenti in ricerca e innovazione nel settore ferroviario 59

DESCRIZIONI DEGLI SCENARI TECNOLOGICI **61**

N.1 MOBILITÀ A BASSE O ZERO EMISSIONI 63
Mobilità aerea: velivoli elettrici ed ibridi 64
Mobilità aerea e stradale : batterie ad alte prestazioni 65
Mobilità aerea: motori a idrogeno 70
Trasporto terrestre: fuel cell per la propulsione 73
Accumulo di idrogeno e distribuzione 75
Trasporto terrestre: retrofit per alimentazione con GNL dei veicoli 76
Trasporto marittimo: soluzioni per la sostenibilità ambientale ed efficienza energetica 77
Trasporto ferroviario: sistemi energetici innovativi e gestione del ciclo vita 79

N.2 NUOVE INFRASTRUTTURE AEREOPORTUALI/PORTUALI **83**
Mobilità aerea: infrastrutture aereoportuali e stazioni di carica 83
Trasporto marittimo: infrastruttura di comunicazione e connettività a bordo e nave 84
Trasporto marittimo: Logistica del sistema portuale 84

indice - scenari tecnologici

N.3 NUOVE CONFIGURAZIONI DI MEZZI DI TRASPORTO 87
Mobilità aerea: configurazioni del veivolo 87
Mobilità aerea: struttura e sistemi dei veivoli 88
Trasporto marittimo: strutture e architetture dei natanti 88
Trasporto marittimo: nuovi mezzi marini per la Blue Economy 90
Trasporto stradale: Light vehicle 91
Trasporto marittimo: Navi autonome 93

N.4 DIGITALIZZAZIONE DEL SISTEMA TRASPORTI 95
Mobilità aerea: avionica 95
Trasporto marittimo: digitalizzazione e automazione 96
Trasporto ferroviario: digitalizzazione e automazione 97
Trasporto marittimo: Transizione del processo produttivo 99

N.5 MOBILITÀ URBANA E INTERURBANA MULTIMODALE E AUTOMATIZZATA 101
Connettività 104
Mobility as a service (MaaS) 106
Smart Roads 109
Tecnologie di prova ed omologazione, aspetti normativi e valutazione degli scenari operativi 113

N.6 PROPULSIONE STRADALE INNOVATIVA 117
e-Fuels 119
Motori alternativi ad idrogeno (H2_ICE) 119
Split - Cycle - Engine 122
Free Poston Linear Engine 123

N.7 TRASPORTO TERRESTRE DELLE MERCI 125
Tecnologie per il trasporto ferroviario 126
Tecnologie per il trasporto stradale 128

Prefazione

Da oltre venticinque anni, Airi coinvolge manager e ricercatori provenienti da alcune delle principali imprese, centri di ricerca e università, italiane per identificare e analizzare quali siano le tecnologie ad alto impatto socioeconomico destinate a trasformare il sistema industriale.
Giunto alla XI edizione, il Rapporto Airi Le Innovazioni del Prossimo Futuro è uno studio di technology assessment e foresight unico a livello nazionale. E un quadro aggiornato degli scenari tecnologici che contribuiranno, nel breve-medio periodo e in maniera trasversale e abilitante, all'innovazione nei principali settori produttivi.
Dieci settori e oltre 130 scenari tecnologici che fotografano la ricerca industriale italiana, che da sempre ha una significativa propensione all'esportazione nel mondo della tecnologia.

Il presente volume monografico è dedicato al settore dei trasporti e della mobilità.

La tecnologia è oggi un fattore determinante per la competitività del sistema Paese. L'impegno e gli investimenti in Ricerca e Innovazione aiutano le imprese a adattarsi alle rapide dinamiche del contesto socioeconomico e ai mutamenti della domanda. Oggi più che mai, la tecnologia è il fulcro della competitività del sistema Paese, condizionando in modo decisivo le traiettorie di crescita, innovazione e autonomia strategica. Le scelte di oggi determineranno la posizione del sistema Paese nelle diverse catene del valore globali per i prossimi anni, se saremo in grado di presidiare le nostre nicchie e posizioni da leader o se ci riserva un futuro da follower.

Lo studio si propone come una guida per i decision-maker di istituzioni, industrie e investitori, con l'obiettivo di anticipare e comprendere l'evoluzione del futuro tecnologico e i suoi impatti più rilevanti sulla società.

Nel corso degli anni, le analisi condotte da Airi hanno identificato in anticipo numerose tecnologie, oggi ritenute ad alto impatto e abilitanti per l'innovazione. Si ricordano ad esempio la sensoristica (es. l'internet delle cose), i big data e le altre tecnologie digitali

per la connettività e l'automazione di veicoli e infrastrutture, già presenti nella edizione 2012 e poi diventate sempre più significative in termini di applicazioni e impatti nelle successive analisi (2016, 2020) e con un ruolo determinante nella presente edizione.
L'obiettivo del nostro lavoro è stimolare una riflessione puntuale sulle priorità, le risorse, gli strumenti più opportuni per promuovere uno sviluppo sostenibile a livello sociale, ambientale ed economico. Per un futuro tecnologico promettente è necessario lavorare insieme – istituzioni, imprese e ricerca pubblica – per comprendere e condividere gli asset e le risorse su cui investire. Aggiungo che gli scenari descritti nei volumi hanno anche un significativo valore per le Istituzioni educative come materiali di orientamento e di formazione nell'istruzione tecnico scientifica.

Un sentito ringraziamento ai coordinatori di settore, ai numerosi esperti, ai soci e non soci, e allo staff Airi, che hanno generosamente messo a disposizione il loro tempo e le loro competenze. Senza il loro contributo, la loro competenza e le loro visioni, la realizzazione di questo studio non sarebbe stata possibile.

Tutti nutrono la speranza che questo sforzo possa essere utile ai Programmi operativi e alle prossime Strategie europee, e possa essere utile indicazione per le Istituzioni di ricerca che devono programmare linee di ricerca coerenti con le future sfide della nuova industria.
È un contributo collaborativo alla cultura industriale del Paese che ci rende particolarmente orgogliosi

Andrea Bairati, Presidente Airi

Introduzione

Il Rapporto «Le Innovazioni del prossimo futuro», giunto all'undicesima edizione, riporta a cadenza regolare dal 1995 le previsioni tecnologiche che Airi elabora grazie al contributo delle imprese, degli enti di ricerca, delle istituzioni finanziare associati, in collaborazione con qualificati partner pubblici e privati. È uno studio di *technology assessment* e di f*oresight* che svolge un'analisi di tecnologie e famiglie di tecnologie ad alto impatto socioeconomico su dieci settori produttivi di rilievo per l'economia nazionale. L'analisi di tipo verticale (per settore) viene poi integrata da una valutazione complessiva (orizzontale) delle sinergie, convergenze e trasversalità delle tecnologie selezionate lungo tutti i settori produttivi.

Come nella precedente edizione, pur mantenendo la tradizionale impostazione per settori produttivi, abbiamo diviso il rapporto in due parti: nella prima analizziamo la posizione della ricerca industriale italiana rispetto alla competitività globale e la relazione tra sviluppo tecnologico e sostenibilità; nella seconda illustriamo le azioni e gli investimenti che il nostro sistema industriale sta definendo, anche in collaborazione con gli attori più significativi della ricerca pubblica.

I settori che analizziamo in questa edizione sono dieci: Ambiente e transizione circolare, Costruzioni, Chimica e Materiali, Energia e Decarbonizzazione, Farmaceutica, Meccatronica, Microelettronica e semiconduttori, Tecnologie Digitali, Trasporti e Mobilita, Spazio.

Per ogni settore, sono riportati il quadro o profilo generale che lo caratterizza (imprese, mercato, occupazione, tendenze e criticità, impatti socioeconomici, investimenti in R&S) e gli scenari tecnologici (descrizione, motivazioni per lo sviluppo, stato dell'arte, risorse economiche necessarie) sui quali il sistema della ricerca industriale italiana intende concentrare risorse economiche e intellettuali nel breve-medio periodo.

La definizione di tecnologie prioritarie

Le tecnologie prioritarie sono definite come tecnologie ad alto impatto socioeconomico per il tessuto imprenditoriale e l'economia nazionale. Sono tecnologie abilitanti e sistemiche su catene del valore legate a uno o più settori produttivi, caratterizzate da un rilevante impatto rispetto a una o più delle seguenti dimensioni: industriale (investimenti, capacità abilitante), politico ed economico (es. competitività,

lavoro, politiche di investimento), sostenibilità etico, sociale e ambientale, implicazioni legali (es. necessità o capacità di rispondere a sfide e driver normativi).

I criteri di selezione

Abbiamo individuato oltre 130 tecnologie su dieci settori produttivi analizzati , quasi sempre presentate e raggruppate in scenari tecnologici che fungono da famiglia di riferimento o cluster, attraverso i seguenti criteri:

- Impatto politico ed economico
- Impatto industriale
- Innovatività e time to market
- Impatto etico, legale, sociale e ambientale

Il nostro obiettivo è stato di identificare tecnologie e famiglie di tecnologie con un carattere abilitante per una o più catene del valore e sistemi dell'innovazione. L'orizzonte applicativo o di lancio della ricerca che mette a punto la tecnologia è nel breve medio termine (indicativamente 1 -3 anni, anche a seconda delle caratteristiche del settore), pur non trascurando eventuali tecnologie dirompenti con un ciclo di sviluppo più lungo.

Le tecnologie individuate nelle precedenti edizioni sono state utilizzate come uno dei riferimenti iniziali dello studio, riconoscendo il valore che hanno i dati storici nella validità e affidabilità degli studi *foresight* (la presenza di un ambito tecnologico nel corso di più edizioni dello studio, nelle sue diverse declinazioni e livelli di sviluppo, ne conferma l'importanza).

A chi è rivolto lo studio?

La pubblicazione è rivolta a direttori e manager della ricerca pubblici e privati, ricercatori, istituzioni, investitori, *opinion leader*. Il nostro obiettivo è fornire una guida per le strategie e gli investimenti privati e pubblici in ricerca e innovazione e stimolare una riflessione sulle priorità, le risorse, gli strumenti più opportuni per promuovere uno sviluppo sostenibile a livello sociale, ambientale ed economico.

La metodologia

Lo studio è realizzato mediante l'impegno diretto di esperti della rete Airi, soci e non soci, che nel loro insieme hanno competenze approfondite e riconosciute in relazione

sia ai settori produttivi sia alle diverse tecnologie trattate.
Le attività iniziano con la scelta dei coordinatori dello studio, indicativamente due per settore, nominati in accordo con il Consiglio Direttivo di Airi. Viene costituito quindi il Board dei coordinatori settoriali, che rappresenta il primo nucleo del Gruppo di Lavoro (GdL) Tecnologie Prioritarie. Il coordinamento del GdL è a cura di Airi.
Prima fase: Gruppo di Lavoro e selezione delle tecnologie
Il Gruppo di Lavoro, composto inizialmente dai coordinatori, svolge una prima analisi delle tecnologie da trattare. Vengono considerate diverse fonti, quali piani strategici di sviluppo a livello industriale e politiche per la ricerca e innovazione europee e nazionali. Come dato storico si utilizza il catalogo delle tecnologie trattate nell'edizione precedente (2020). Il coinvolgimento della compagine associativa permette di raccogliere suggerimenti per definire il nuovo catalogo delle tecnologie e gli esperti da coinvolgere.
Vengono riviste le definizioni, la struttura, i modelli da utilizzare per lo svolgimento dello studio.
I risultati della prima fase sono un primo catalogo di tecnologie suddivise per settore, un elenco di esperti collegati a tali tecnologie e settori, delle linee guida condivise per la preparazione dello studio.
Seconda fase: Elaborazione dei profili di settore e degli scenari tecnologici.
I lavori vengono svolti principalmente a livello settoriale. Sulla base del catalogo di tecnologie selezionate nella prima fase, coordinatori ed esperti di ciascun settore si incontrano ed elaborano una versione sintetica degli scenari tecnologici. Il Board dei coordinatori supervisiona regolarmente il programma di attività e fornisce eventuali suggerimenti sulle scelte prese a livello settoriale. Il processo è iterativo, durante l'analisi è possibile rivedere, eliminare o aggiungere tecnologie ed includere, ove necessario, altri esperti.
Il risultato della seconda fase è una prima versione del profilo di settore e degli scenari tecnologici.
Terza fase: Revisione ed integrazione
Il GdL svolge un'attività di revisione complessiva dal punto di vista sia tecnico-

scientifico sia editoriale. L'obiettivo è di arricchire ed integrare i singoli scenari e valutare sovrapposizioni e sinergie tra i diversi settori. Si cerca inoltre, per quanto possibile data la diversità dei temi affrontati e le diverse esigenze settoriali in termini di granularità e di tempi, di dare uniformità al lavoro nel suo complesso.
Il profilo di settore e gli scenari tecnologici vengono rivisti e finalizzati. Il risultato sono le bozze finali del lavoro. Viene infine svolta una revisione editoriale dei singoli capitoli e preparato l'impaginato finale.
Il processo sopra riportato è indicativo e alcune fasi del lavoro sono svolte in parallelo. I lavori di preparazione dell'intero volume, comprensivo dei dieci settori produttivi, si svolgono in un periodo di circa due anni.
Questa edizione dello studio Airi ha coinvolto oltre 180 esperti, tra coordinatori e membri dei gruppi di lavoro settoriali, che sono riportati nelle prime pagine dei capitoli relativi a ciascuno dei diversi settori.
Per la presente edizione, si è scelto di pubblicare in anteprima alcuni dei settori nella forma di volume monografico.

Le limitazioni dello studio

Il lavoro è il risultato delle competenze e della visione di Airi e degli esperti coinvolti nello studio, che determina la tipologia e ampiezza degli ambiti trattati, tra cui in particolare la scelta dei settori e degli scenari tecnologici.
A titolo di esempio, in questa edizione non viene trattato in maniera approfondita il settore agroalimentare (se non come ricaduta di alcune tecnologie settoriali), che invece è di evidente rilievo per l'economia nazionale.
L'approfondimento dei temi trattati è limitato dalla necessità di contenere sia la lunghezza sia l'impegno richiesti dallo studio, anche considerata la partecipazione a carattere volontario di tutti gli esperti coinvolti.
Sono utilizzati dati provenienti da un numero selezionato e limitato di fonti bibliografiche, sia pubbliche sia provenienti da dati interni delle aziende e centri di ricerca coinvolti, che coprono l'intero spettro dei settori selezionati ma che non si possono considerare esaustive.
I contenuti e le opinioni espresse sui possibili scenari di sviluppo tecnologico per il

sistema paese rimangono un esercizio di analisi, deduzione e previsione, come tale soggetto a variabilità ed imprecisioni.

I contenuti

Lo studio analizza una parte rilevante del portafoglio tecnologico del sistema paese. Per ogni settore, viene riportato il quadro o profilo generale che lo caratterizza (imprese, mercato, occupazione, tendenze e criticità, impatti socioeconomici, investimenti in R&S) e gli scenari tecnologici (descrizione, motivazioni per lo sviluppo, stato dell'arte, risorse economiche necessarie) sulle quali il sistema della ricerca industriale italiana intende concentrare risorse economiche ed intellettuali nel breve-medio periodo.

È prevista la pubblicazione delle analisi dei dieci settori sia in forma integrale in due volumi (volume 1, profilo di settore; volume 2, scenari tecnologici), sia in pubblicazioni monografiche (per settore).

Il presente volume rappresenta la pubblicazione settoriale dello studio relativa al settore Trasporti e mobilità.

TRASPORTI E MOBILITÀ

PROFILO DI SETTORE

MEMBRI DEL GRUPPO DI LAVORO

COORDINATORI

CNR - Consiglio Nazionale delle Ricerche	**Emilio Fortunato Campana**

ESPERTI

CNR - Consiglio Nazionale delle Ricerche	**Carla Mazziotti**
AIRI	**Francesco Salvato**

TRASPORTI E MOBILITÀ

SCENARI TECNOLOGICI

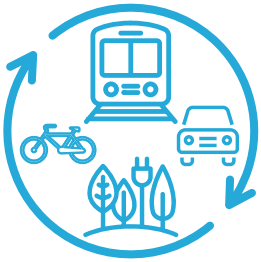
MEMBRI DEL GRUPPO DI LAVORO

COORDINATORI

CNR - Consiglio Nazionale delle Ricerche	**Emilio Fortunato Campana**

ESPERTI

CIRA	**Antonio Blandini**
CNR - Consiglio Nazionale delle Ricerche	**Antonino Salvatore Aricò, Vincenzo Delle Site Chiara Guido, Barbara Mavì Masini, Carla Mazziotti, Simona Silvia Merola, Bianca Vaglieco**
MARITIME TECHNOLOGY CLUSTER FVG	**Lucio Sabbadin**
POLITECNICO MILANO	**Marco Bocciolone, Laura Mazzola, Ferruccio Resta**
BIRD	**Giorgio Cappiello**
POLITECNICO BARI	**Michele Ottomanelli**
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II	**Gennaro Nicola Bifulco**
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI GENOVA	**Angela Di Febbraro**
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA LA SAPIENZA	**Gaetano Fusco**
FRATELLI D'AMICO ARMATORI SpA	**Massimo de Domenico**
MOTUS-E	**Federico Naso, Matteo Gizzi**
AIRI	**Francesco Salvato, Andrea Porcari**



SETTORE

TRASPORTI E MOBILITÀ

PROFILO DI SETTORE

INTRODUZIONE

Il settore dei trasporti è uno dei pilastri dell'economia sia in Europa che in Italia. Nel seguito sarà data prevalenza al punto di vista europeo e italiano anche se la maggior parte delle considerazioni di sistema e le soluzioni tecniche e degli abilitanti è applicabile ed ha senso in ottica di una larga applicazione globale pur con peculiarità derivate da specifiche situazione demografiche, economiche o di orografia che suggeriscono soluzioni diverse da quelle elettive per il caso europeo o italiano. In quasi tutti i casi la dimensione globale è l'unica capace di sopportare gli enormi investimenti necessari a sviluppare soluzioni avanzate quali ad esempio la propulsione elettrica nel caso automotive, l'adozione dell'idrogeno come fonte di energia a basse emissioni di CO_2 o standard globali di sicurezza aerea.
Le caratteristiche principali di questo settore includono la presenza di diverse modalità di trasporto come strada, ferrovia, aereo e mare, la presenza di una vasta gamma di operatori che offrono servizi di trasporto, la necessità di infrastrutture efficienti per garantire la mobilità delle persone e delle merci. Infine, sta sempre più rendendosi evidente la necessità di una stretta interazione tra le varie modalità di trasporto sia merci sia passeggeri che richiedono soluzioni tecniche, interazioni e gestione di dati in quantità e qualità molto diversi da quanto finora affrontato.

Lo scenario di medio termine perseguito in Europa prevede una mobilità basata su un sistema di trasporto multimodale efficiente e interconnesso, sia per i passeggeri sia per le merci, supportato da un'adeguata infrastruttura alla mobilità che preveda anche la ricarica e rifornimento per veicoli a basse o zero emissioni e carburanti rinnovabili. Molti di questi miglioramenti richiedono il concorso sinergico di altri settori industriali che dovranno fornire energia, materiali, processi e tecniche avanzate. Un esempio primario viene dal settore digitale che potrà contribuire a migliorare ulteriormente i livelli di sicurezza, protezione, affidabilità e comfort, e migliorando la nostra resilienza e competitività globale attraverso catene logistiche efficienti e resilienti.

In campo europeo e nazionale viene data rilevante importanza al miglioramento dell'impatto ambientale dei trasporti che, ambiscono una riduzione del 90% delle emissioni del settore entro il 2050.

IL MERCATO

Come seconda area di spesa per le famiglie europee, il settore dei trasporti contribuisce al 5% del PIL europeo e impiega direttamente circa 10 milioni di lavoratori.

PIL: Con circa 750 B€ di PIL, il settore dei servizi di trasporto e magazzinaggio (incluse le attività postali e di corriere) ha rappresentato circa il 5,2% del PIL totale della EU-27. Va notato, tuttavia, che questa cifra include solo il PIL delle aziende la cui attività principale è la fornitura di servizi di trasporto (e correlati al trasporto) e che le operazioni di trasporto per conto proprio non sono incluse (vedi dopo, effetti indotti).

Occupazione: Nel 2022, il settore dei servizi di trasporto e magazzinaggio (incluse le attività postali e di corriere) nell'EU-27 ha impiegato circa 10,5 milioni di persone, cioè circa il 5,3% della forza lavoro totale. Circa il 52% di loro nel trasporto terrestre (strada, ferrovia e condotte), il 3% nel trasporto via acqua (mare e vie navigabili interne), il 3% nel trasporto aereo e il 27% in attività di magazzinaggio e supporto (come movimentazione merci, stoccaggio e deposito) e il restante 14% in attività postali e di corriere. Il 22% delle persone impiegate nel settore dei trasporti sono state donne.

Spesa delle famiglie: Nel 2022, le famiglie private nell'EU-27 hanno speso 1.025 B€ pari a circa il 12,5% del loro consumo totale in articoli correlati al trasporto. Circa il 26% di questa somma (circa 265 B€) è stato utilizzato per acquistare veicoli, il 59% (603 B€) è stato speso per il funzionamento di attrezzature di trasporto personali (ad esempio per acquistare carburante per l'auto) e il resto (158 B€) è stato speso per servizi di trasporto (ad esempio biglietti di autobus, treno, aereo).

Trasporto merci: Nel 2022, si stima che le attività totali di trasporto merci, cifra include il trasporto aereo e marittimo intra-EU, sono ammontate a 3.471 miliardi di tonnelate km (tkm). Di questi, il trasporto su strada ha rappresentato il 53,8% del totale intra-EU, la ferrovia l'11,9%, le vie navigabili interne il 3,5% e gli oleodotti il 2,7%. Il trasporto marittimo intra-EU è stato il secondo modo più importante

con una quota del 28%, mentre il trasporto aereo intra-EU ha rappresentato solo lo 0,1% del totale. In termini di valore le attività di trasporto merci tra l'EU e il resto del mondo hanno avuto un valore di 5066 B€ di cui il 46.7% per via mare e circa il 22% per via aerea a stradale mentre in peso sono state pari a 2182 Mton di cui ben il 73, 9% via mare, lo 8,6% via stradale lo 1% via aerea.

Trasporto passeggeri: Nel 2022, si stima che le attività totali di trasporto passeggeri nell'EU-27 con qualsiasi mezzo di trasporto motorizzato sono state di 5.617 miliardi di persone kilometro (PMK) cioè in media circa 12.545 km a persona. Questa cifra include il trasporto aereo e marittimo intra-EU, ma non le attività di trasporto tra l'EU e il resto del mondo. Le autovetture passeggeri hanno rappresentato il 73% di questo totale, i veicoli a due ruote a motore il 2%, gli autobus e i pullman il 7,2%, le ferrovie il 7,2% e i tram e la metropolitana l'1,2%. Il trasporto aereo intra-EU e il trasporto marittimo intra-EU hanno rappresentato rispettivamente il 9,1% e lo 0,3%.

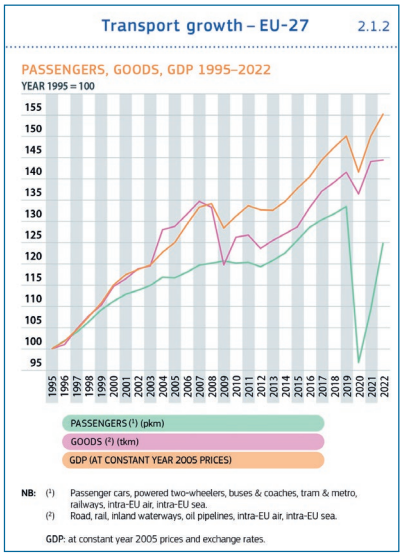


Figura 1: PKM e TKM per modalità trasporto in EU.
Da EU Transport in Figure:
Statistical Pocketbook 2024 (doi:10.2832/16593)

Sicurezza: Strada: 20.653 persone sono morte in incidenti stradali (morti entro 30 giorni) nel 2022, il 3,7% in più rispetto al 2021 (quando hanno perso la vita 19.916 persone). Rispetto al 2001, il numero di vittime della strada è stato inferiore di circa due terzi (-59,8%). Ferrovia: 20 passeggeri hanno perso la vita nel 2022; questa cifra non include le vittime tra i dipendenti delle ferrovie o altre persone investite dai treni. Aereo: nessuna vita è stata persa nel 2023.

Ambiente: L'importante impatto ambientale del settore trasporto è ben illustrato

dalla fig. 2 che mostra, al netto della diminuzione avvenuta del 2020 per via del COVID 19, come i trasporti stanno aumentando in modo significativo il loro impatto ambientale a fronte di una generale riduzione degli altri settori industriali. Al contempo la fig. 3 mostra come il trasporto aereo registra un incremento significativo nel tempo a fronte di una stabilizzazione o riduzione delle emissioni deglii altri settori.

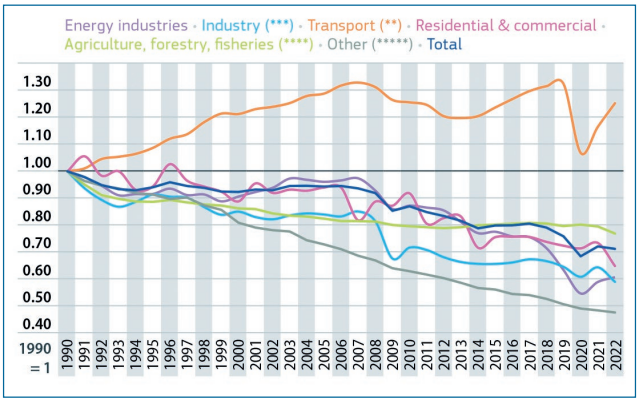


Figura 2: Emissioni di GHG (Green House Gases) dei settori industriali in EU.
Da EU Transport in Figure: Statistical Pocketbook 2024 (doi:10.2832/16593)

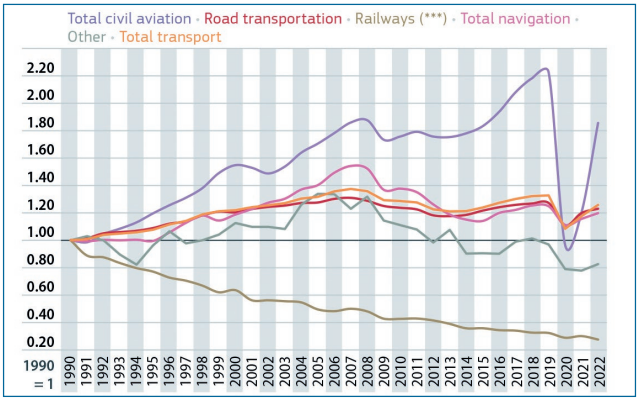


Figura 3: Emissioni GHG per modalità di trasporto.
Da EU Transport in Figure: Statistical Pocketbook 2024 (doi:10.2832/16593)

Fig 2 *Note alla figura (dal Pocktbook): (*) Excluding LULUCF (land use, land-use change and forestry) emissions and international maritime, including international aviation and indirect CO_2; (**) Excluding international maritime (international traffic departing from the EU), including international aviation;; (***) Emissions from manufacturing and construction, industrial processes and product use;; (****) Emissions from fuel combustion and other emissions from agriculture;; (*****) Emissions from fuel combustion in other (not elsewhere specified), fugitive emissions from fuels, waste, indirect CO_2 and other.*

Fig 3 *Nota alla figura (dal Pocketbook): (***) Excluding indirect emissions from electricity consumption;*

In termini assoluti invece le emissioni del settore trasporti sono largamente causate dal trasporto stradale come evidenziato in fig. 5.
Le prospettive del settore dei trasporti per il 2024 ed anni successivi riflettono una complessa interazione di opportunità di crescita e sfide significative in diverse regioni e modalità di trasporto. Mentre alcune aree mostrano una crescita promettente guidata dalla domanda dei consumatori e dagli investimenti governativi, altre devono destreggiarsi tra eventi contrari economici e inefficienze operative. Le parti interessate dovranno adattarsi strategicamente per capitalizzare le tendenze emergenti, affrontando al contempo gli imperativi di sostenibilità.

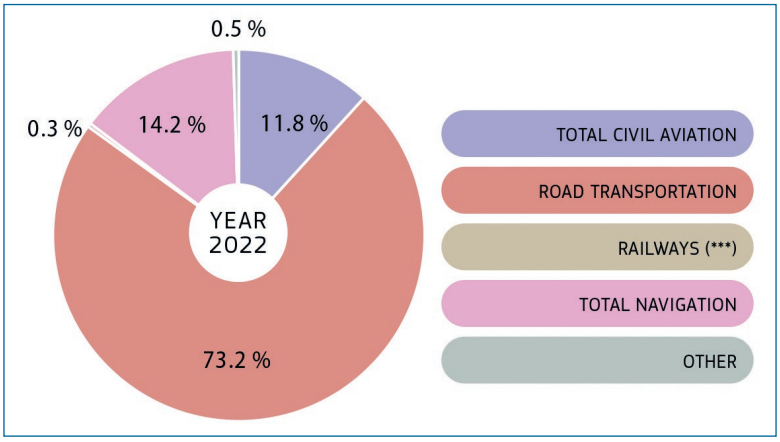


Figura 4: Emissioni GHG per modalità di trasporto.
Da EU Transport in Figure: Statistical Pocketbook 2024 (doi:10.2832/16593)

La situazione Italiana

Trasporto su strada. In Italia, il settore automotive coinvolge 15.000 imprese, il 3% della forza lavoro, corrispondente al 7% degli impiegati nell'industria manifatturiera, con ricavi pari al 7.1% del PIL. La filiera comprende tutta la catena dai fornitori di componenti e servizi agli OEM. L'esigenza di rendere più sostenibile il sistema dei trasporti giustifica norme che impongono una drastica riduzione delle emissioni, raggiungibile solo tramite l'elettrificazione, l'idrogeno e i combu-

stibili alternativi. È importante notare nel caso del trasporto su strada che dal 2035 i costruttori EU non potranno produrre più veicoli con motori termici secondo l'esistente normativa EU. Questa rivoluzione tecnica con significative conseguenze sui contenuti tecnici ed industriali associata alla contemporanea introduzione di sistemi di comunicazione e di elaborazione dati richiederà la necessità di concepire e produrre veicoli con livelli sempre più alti di autonomia, sostenibili e sicuri. La sfida dell'industria dell'auto italiana è di adattarsi a questi cambiamenti e riuscire a traguardare gli obiettivi di decarbonizzazione definiti dall'EU (Fit for 55), che prevedono la riduzione del 43% di emissioni di gas climalteranti al 2030 rispetto al livello di emissione registrato al 2005. In particolare, in Italia sono in circolazione 694 auto ogni mille abitanti, un livello che pone il nostro Paese al primo posto in Europa per tasso di motorizzazione (in EU la media è di 571 auto per mille abitanti). Rispetto al 2018, quando erano in circolazione 652 vetture per mille abitanti, il tasso di motorizzazione italiano è cresciuto del 6,4%: un incremento equivalente a 42 auto in circolazione in più ogni mille abitanti (da elaborazione dell'Osservatorio Autopromotec su dati Aci ed Eurostat -dicembre 2024).

Navale. Il settore navale italiano è al secondo posto in Europa, subito dopo la Germania, e al quinto nel mondo. È in grado di generare un fatturato complessivo di 8,3 miliardi di euro (dato 2023), pari al 3,38 ‰ del PIL nazionale. Nel 2023, il fatturato complessivo ha avuto come destinazione il mercato domestico per 2,57 miliardi di euro (pari al 30,8%) e i mercati esteri per 5,76 miliardi di euro (pari al 69,2%) (dato di Confidustria Nautica). Questo risultato, che include la produzione di barche e yacht, il refit e rimessaggio e la realizzazione di motori e accessori, supera il precedente massimo storico di 6,2 miliardi di euro registrato nel 2007, come riportato nell'analisi annuale di Confindustria Nautica. La maggior parte di esse, circa il 90%, sono PMI, ma il settore navale italiano può vantare player di importanza strategica e reputazione internazionale (Fincantieri, Azimut – Benetti, Ferretti etc) in tutti tipi di produzione di mezzi navali dalle grandi navi da trasporto e crociera alla nautica di diporto di qualunque dimensione e classe. Il settore impiega circa 14.800 addetti nel 2023 (Confindustria Nautica) numero che sale a

16.890 considerando anche gli addetti esterni. Complessivamente, considerando occupati diretti e indiretti e tutti i segmenti (costruzione, refit, accessori, motori) l'industria nautica italiana occupava 30.690 persone nel 2023, con un incremento del 7% sul 2022. Con un traffico navale nei porti Italiani di 70.8 milioni di viaggiatori e 474.4 milioni di merci nel 2023. Il settore navale investe circa il 9% del fatturato del settore in ricerca, sviluppo e innovazione, consolidando e rafforzando il ruolo di punta dell'UE nella ricerca e innovazione, nella sostenibilità del settore delle vie navigabili e nelle tecnologie digitali.

Ferroviario. In Italia, il settore ferroviario coinvolge 68.568 dipendenti di cui 28.292 addetti alla gestione infrastrutturale e 40.276 alle imprese ferroviarie con 12.549 conducenti di treni. Il fatturato complessivo (Trasporti ferroviari ed elettrificati) è di 5.339 Mln€ con una quota di esportazioni del 1.115 Mln€ (dato assifer.anie.it). Il settore ferroviario italiano comprende tutta la catena dai fornitori di componenti e servizi agli OEM di servizi infrastrutturali a quelli di manutenzione della rete. Dopo due anni di calo, il trasporto ferroviario delle merci nell'Unione Europea ha registrato una ripresa nel 2021, con un aumento del +8,7% rispetto al 2020, ritornando ai livelli del 2018 con un totale di 399 miliardi di tonnellate-km trasportate, e mantenendosi pressoché costante nel 2022 (-0,5% rispetto al 2021). Le tonnellate-km trasportate in Italia sono sostanzialmente omogenee a quelle movimentate nei principali Paesi del continente con caratteristiche simili dal punto di vista geografico, economico e sociale evidenziando nel 2023, 51,7 milioni di treni-km e 23,3 miliardi di tonnellate-km (per entrambe del -4% rispetto al 2022). Il confronto tra l'andamento delle due misure di analisi del traffico ferroviario, ossia treni-km e tonnellate-km, evidenzia inoltre un miglioramento dell'efficienza nel trasporto su ferro. Pur mostrando una coerenza sostanziale nell'andamento delle due variabili, è importante notare che, nel periodo compreso tra il 2010 e il 2023, le tonnellate-km trasportate sono cresciute del +25%, mentre i treni-km hanno registrato una crescita più contenuta, pari al +21%. Questo fenomeno è principalmente attribuibile all'avanzamento tecnologico della rete e dei mezzi, con l'introduzione di treni più lunghi e con maggiore capacità di carico, unitamente a

un miglioramento organizzativo dei flussi (Report FERMERCI Annuale 2023).

Aeronautica. Il settore aeronautico italiano è solidamente al quarto posto in Europa e al settimo nel mondo. È in grado di generare un fatturato complessivo di 13,5 miliardi di euro, pari allo 0,65% del PIL; il valore aggiunto complessivo è di circa 12 miliardi di euro. Fattore fondamentale è l'innovazione e la ricerca, per la quale il settore impiega circa il 10% del fatturato, mantenendosi nella media europea. Circa 50.000 addetti specializzati sui più di 200.000 totali nella filiera sono impiegati nelle oltre 4.000 aziende che costituiscono l'indotto. La maggior parte di esse, circa il 90%, sono PMI, ma il settore aeronautico italiano può vantare player di importanza strategica e reputazione internazionale (Leonardo, Avio Aero, Piaggio, Tecnam). Il traffico aereo Italia nell'ultimo anno consta di 219.078.618 milioni di viaggiatori e 1,25 milioni di tonnellate di merce trasportata

IMPATTO SOCIOECONOMICO

I sistemi di trasporto -internazionali, regionali e locali- sono diventati componenti fondamentali dell'attività economica con rilevanti effetti sociali. Il trasporto si sta evolvendo all'interno di un complesso insieme di relazioni tra l'offerta di trasporto, che riflette la capacità operativa della rete, la domanda di trasporto e i requisiti di mobilità legando al commercio e alla distribuzione una quota crescente della ricchezza con effetti rilevanti su stili di vita, aspettative, ambizioni sociali e culturali.

Impatti economici

Il sistema dei trasporti, che include la mobilità di persone e merci, implica una forte interazione tra infrastrutture e sistemi di gestione delle operazioni e manutenzione. I servizi offerti o richiesti di molte attività di trasporto includono anche una stretta relazione tra contributi materiali e umani. Ad esempio, una logistica efficace si basa sia su infrastrutture adeguate sia su competenze manageriali estremamente specialistiche.

Il settore dei trasporti richiede estese infrastrutture, comprese le infrastrutture di gestione dell'informazione e della comunicazione. Le infrastrutture di trasporto ad alta densità e le reti altamente connesse sono comunemente associate a livelli elevati di sviluppo. Sistemi di trasporto efficienti forniscono opportunità e benefici economici e sociali che si traducono in effetti moltiplicatori positivi, come una migliore accessibilità ai mercati, all'occupazione e agli investimenti aggiuntivi. Sistemi di trasporto carenti in termini di capacità o affidabilità, possono avere un costo economico, offrono opportunità ridotte o mancate e una qualità della vita inferiore. Ad esempio, la congestione è spesso una conseguenza indesiderata della fornitura agli utenti di infrastrutture di trasporto gratuite o a basso costo. Ma anche al contrario, la congestione indica un'economia in crescita in cui capacità e infrastrutture hanno difficoltà a tenere il passo con le crescenti richieste di mobilità.
In generale il valore aggiunto e gli effetti dei servizi di trasporto solitamente si estendono oltre quelli generati dalla sua attività. Si possono infatti riconoscere:

• **Impatti diretti.** Il trasporto fornisce occupazione, valore aggiunto, mercati più grandi, nonché miglioramenti di tempo e costi quale risultato della migliore capacità ed efficienza dei mezzi di trasporto ed infrastrutture usate.

• **Impatti indiretti**. Il valore aggiunto indiretto e i posti di lavoro nelle attività con altri settori economici (ad esempio aziende di forniture per ufficio, fornitori di attrezzature e parti, servizi di manutenzione e riparazione, compagnie assicurative, consulenza e altri servizi aziendali) direttamente dipendenti grazie ai collegamenti permessi dai sistemi di trasporto.

• **Impatti indotti.** Il risultato degli effetti creati dalla diminuzione del prezzo di materie prime, beni o servizi o aumento della loro varietà resi possibili dai trasporti. Ad esempio, l'importazione economicamente efficiente di minerali e l'esportazione di prodotti finiti; produttori, punti vendita al dettaglio e centri di distribuzione che importano merci grazie a trasporti efficienti; effetti su siti turistici e relativa economia alberghiera e ristorazione.

Il trasporto collega i fattori di produzione in una complessa rete di relazioni collegando produttori e consumatori. La crescita economica è sempre più legata allo sviluppo dei trasporti sia come infrastrutture sia per le competenze manageriali necessarie al suo funzionamento. Pertanto, sebbene il trasporto sia un'attività ad alta intensità di infrastrutture, le risorse materiali devono essere supportate da una serie di risorse immateriali, vale a dire manodopera, gestione e sistemi informativi capaci di prendere decisioni sull'utilizzo e la gestione dei sistemi di trasporto al fine di ottimizzare i vantaggi e ridurre al minimo costi e inconvenienti. Sebbene lo sviluppo economico moderno sia diventato meno dipendente dalle risorse, che pur rimangono il fondamento delle attività economiche, esso è più dipendente dalle relazioni attraverso lo spazio, cioè a livelli più elevati di flussi e mobilità di materiali, manodopera e capital in due aspetti significativi:

• **Mercato delle materie prime e componenti.** Il trasporto amplia le opportunità di acquisire e vendere una varietà di materie prime o componenti e parti necessarie per i sistemi industriali e manifatturieri attraverso miglioramenti nell'efficienza con cui le aziende hanno accesso a materie prime e parti nonché ai rispettivi clienti.

• **Mercato del lavoro.** Miglioramenti nell'accesso alla manodopera e una riduzione dei costi di accesso, principalmente tramite un miglioramento del pendolarismo (scala locale) o l'uso di manodopera a basso costo (scala globale) grazie a trasporti efficienti a corto o lungo raggio.

Un errore comune nel valutare l'importanza e l'impatto del trasporto sull'economia è quello di concentrarsi solo sui costi di trasporto, che tendono a essere relativamente bassi; nell'intervallo dal 5 al 10% del valore di un bene. Pertanto, costi di trasporto relativamente piccoli, capacità e cambiamenti di prestazioni possono avere un impatto sostanziale sulle attività economiche. Un sistema di trasporto efficiente con infrastrutture moderne favorisce i cambiamenti economici, la maggior parte dei quali positivi, sotto diversi aspetti:

• **Specializzazione geografica.** I miglioramenti nei trasporti permettono di produrre beni e servizi dove esiste la combinazione più appropriata di capitale, lavoro e materie prime.

• **Produzione.** Un sistema di trasporto efficiente che offre vantaggi in termini di costi, tempo e affidabilità consente il trasporto di beni su distanze maggiori permettendo una produzione di massa ed economie di scala accedendo a mercati più grandi.

• **Maggiore concorrenza.** Quando il trasporto è efficiente, il mercato potenziale per un dato prodotto (o servizio) aumenta, così come la concorrenza, riducendo i costi e promuovendo qualità e innovazione.

• **Variazione del valore dei terreni e immobili.** I terreni ed immobili adiacenti o serviti da buoni servizi di trasporto hanno generalmente un valore maggiore perché i consumatori possono avere accesso a una gamma più ampia di servizi e beni al dettaglio e una migliore accessibilità a occupazione, servizi e reti sociali.

Impatti sociali

I sistemi di trasporto permettono la mobilità di beni e persone, con un impatto significativo sulla gran parte delle attività umane e, di conseguenza, ad essi afferisce una quota rilevante di consumo (lavoro, capitale, tempo). La mobilità

dipende e influisce sul contesto economico e sociale di territori, sistemi economici, stati, oltre ad essere ormai diventato uno dei principali indicatori dello status sociale degli individui.

Ad un settore così pervasivo sono associati impatti complessi e diversificati, necessariamente sia positivi sia negativi. Alcune delle sfide sociali ed economiche più rilevanti, e rispetto alle quali l'innovazione tecnologica può giocare un ruolo rilevante, sono descritte nel seguito.

- **Differenze di mobilità tra aree urbane ed a minore densità di popolazione** dove è meno conveniente l'uso di forme di trasporto collettive ma al contempo la mobilità deve consentire ai residenti di accedere a occupazione, beni e servizi.
- **Mobilità e comportamento di viaggio diseguali tra gruppi sociali**, comprese le rispettive risorse di trasporto, come la proprietà di auto, l'accesso ai trasporti pubblici e la distanza media di viaggio, la frequenza e il tempo. La domanda di mobilità e trasporto dipende dallo stato socioeconomico.
- **Disuguaglianze di accessibilità** a mercati, servizi o opportunità occupazionali a scala nazionale o locale.
- **Disuguaglianze occupazionali** nel settore dei trasporti tra gruppi sociali diversi. Ad esempio, la logistica è ad alta intensità di manodopera e tradizionalmente e dominata dagli uomini.
- **Reti di trasporto utilizzate oltre le loro capacità**, in particolare nelle aree urbane. Questa situazione crea una congestione della mobilità con relativi costi, ritardi -il fattore tempo è sempre più prezioso nelle economie avanzate- spreco di energia che indicono sulla distribuzione dei beni e sui movimenti delle persone. È anche vero però che la congestione è l'effetto di un successo che supera quanto inizialmente previsto e progettato.
- **Sicurezza del trasporto e delle infrastrutture**. A causa di errori umani e guasti fisici del mezzo di trasporto o infrastrutturali si verificano incidenti con importanti impatti socioeconomici quali costi di assistenza sanitaria, assicurazione, danni alla proprietà e perdita di vite. Il livello di sicurezza dipende dalla modalità di trasporto e dalla velocità del mezzo di trasporto. Nessuna modalità è completamente sicura, ma il trasporto stradale rimane la modalità più rischiosa, rappresentando in media il 90% di tutti gli incidenti.

I sistemi di trasporto hanno una vasta gamma di conseguenze ambientali ed impatti negativi sulla salute che hanno un costo che deve essere assunto dagli utenti e dalla società. Le sfide ambientali più salienti che hanno conseguenze sociali includono:

- **Qualità dell'aria**. Circa il 50% di tutto l'inquinamento atmosferico nelle regioni urbane deriva dal traffico automobilistico.
- **Rumore**. Il rumore ha effetti diversi a seconda dell'intensità delle emissioni è può provocare disturbi psicologici funzionali e fisiologici, in particolare per le aree vicine a centri di smistamento e alle strade principali.
- **Qualità dell'acqua**. Il deflusso accidentale o lo scarico di inquinanti dovuto al funzionamento o alla manutenzione, contaminano le acque superficiali e sotterranee.
- **Impronta sul territorio**.

PARADIGMI FUTURI

Il settore dei trasporti passeggeri e merci -nella sua globalità, a livello europeo e nazionale- sarà influenzato in modo fondamentale da cambiamenti sociali e tecnici, cioè tecnologie abilitanti e nuove esigenze della società, che si svilupperanno nei prossimi anni, le quali porteranno a profondi cambiamenti nell'intero settore ed indirizzeranno la definizione delle future priorità della ricerca sui trasporti. I paradigmi sociali di riferimento sono quasi gli stessi nel trasporto passeggeri e merci nonostante le apparenti differenze dei due settori. Per quanto riguarda il trasporto passeggeri si individuano i seguenti aspetti sociali rilevanti:

- **invecchiamento della società** - invecchiamento della popolazione mondiale; aumento dell'aspettativa di vita;
- **crescita economica** - crescita della produzione economica mondiale; crescita del PIL; aumento del commercio internazionale; stili di vita in evoluzione cambiamenti demografici; cambio generazionale; lavori flessibili; telelavoro; acquisti online; aumento del consumo collaborativo; sharing economy;
- **domanda e fonti di energia** - aumento del consumo di energia, investimenti energetici, utilizzo di fonti di energia rinnovabili e combustibili alternativi, efficienza dei carburanti, mix energetico globale;
- **sfide ambientali** – cambiamenti climatici (diminuzione delle emissioni di carbonio, aumento della temperatura globale, innalzamento del livello del mare, aumento del rischio di inondazioni dovuto allo scioglimento dei ghiacciai, politiche di adattamento e mitigazione, sviluppo dei mercati del carbonio);
- **scarsità di risorse chiave** – gestione e maggiori richieste di risorse scarse; sviluppo di materiali sostitutivi; cambiamenti nell'uso degli ecosistemi;
- **spostamento del potere economico** - "sud globale" in crescita; mondo multipolare; offerta di materie prime dai paesi in via di sviluppo;
- **urbanizzazione e megalopoli** - maggiore densità di popolazione, miglioramenti nelle infrastrutture urbane, rischi ambientali e sanitari; città più sostenibili.
- **equità ed inclusione** – distribuzione dei servizi di mobilità come risorsa universale, rispettosa delle esigenze e capacità (economiche, sociali e digitali) dei cittadini.

Nel caso del futuro trasporto merci a questi si aggiunge un punto estremamente critico di cui già si vedono i primi effetti derivanti dagli scenari geopolitici in continua evoluzione:

- **problemi di sicurezza** - crescente minaccia di criminalità informatica; tassi di criminalità; vulnerabilità delle catene di fornitura globali che incidono pesantemente sul tipo, costi e modalità di trasporto di molte merci critiche.

A questi paradigmi sociali dovrà rispondere un'innovazione tecnologica che proporrà soluzioni, con alta probabilità comuni ai due tipi di trasporto, capace di offrire soluzioni per esigenze e bisogni in continua evoluzione garantendo una mobilità efficiente e sicura. La cooperazione tra tutti gli attori del settore sarà fondamentale per affrontare le sfide future e favorire la crescita economica.
L'innovazione tecnologica nel settore dei trasporti punta oggi verso due vaste aree abilitanti: la sostenibilità ambientale e la digitalizzazione dei servizi di trasporto che insieme consentono l'integrazione dei vari sistemi di mobilità, aumentano la sicurezza e la comodità dei viaggiatori, promuovono la creazione di infrastrutture di supporto dei mezzi di trasporto pubblico più efficienti, accessibili, equi.
Sul versante sostenibilità ambientale si individuano i seguenti indirizzi tecnologici generali:

- **Mobilità a basso impatto ambientale** (elettrico, idrogeno, carburanti non fossili, possibili ibridi): l'utilizzo di queste soluzioni di mobilità può ridurre le emissioni di gas serra e contribuire a una maggiore sostenibilità ambientale nel settore dei trasporti. Le conseguenze vanno bel oltre il settore trasporti influendo in maniera decisiva sui settori energia, chimica, materiali che dovranno fornire soluzioni affidabili nella richiesta quantità e qualità.
- **Mobilità condivisa:** la mobilità condivisa (auto, ma anche monopattini, ciclomotori, biciclette) permette di ridurre il numero di veicoli in circolazione e di ottimizzare l'utilizzo delle risorse, riducendo l'impatto ambientale legato al trasporto individuale. Le conseguenze non banali sulla catena del valore e sul settore industriale ed occupazionale sono già visibili

- **Trasporti pubblici efficienti:** la promozione della mobilità con l'utilizzo di mezzi pubblici contribuisce a ridurre il traffico e le emissioni nocive ma richiederà probabilmente un ripensamento profondo del sistema.
- **Infrastrutture sostenibili:** la realizzazione di autostrade verdi, con pannelli solari integrati e impianti di ricarica per veicoli elettrici lungo il percorso, può favorire la sostenibilità dei trasporti su lunghe distanze. Lo sviluppo di porti ed aeroporti a basso impatto ambientale capaci di gestire e rifornire mezzi di trasporto con fonti di energia a basso impatto ambientale.
- **Logistica sostenibile:** promuovere soluzioni di trasporto a basso impatto ambientale come il trasporto su rotaia o il trasporto marittimo contribuisce a ridurre l'impatto ambientale dei trasporti merci nonostante la crescita prevista grazie all'espansione dell'e-commerce, con una domanda crescente di servizi di magazzinaggio e corriere, mentre le abitudini dei consumatori si spostano verso lo shopping online.

La digitalizzazione che si riferisce all'adozione di tecnologie digitali e innovative per ottimizzare e migliorare l'efficienza, la sicurezza e la qualità dei servizi di trasporto propone esempi di digitalizzazione dei servizi di trasporto possibili tra cui:

- **App di trasporto pubblico** che forniscono informazioni in tempo reale sugli orari delle opzioni combinate degli autobus, treni e tram su determinate tratte.
- **Sistemi di prenotazione e pagamento online** per taxi, mezzi pubblici, servizi di car sharing anche integrati su diversi mezzi di trasporto che operano e coprono una determinata tratta.
- **Utilizzo di sensori e dispositivi IoT** per monitorare e gestire il traffico e il flusso di veicoli.
- **Lo sviluppo di infrastrutture intelligenti,** come ad esempio sistemi di gestione del traffico e di parcheggio intelligente, può contribuire a ottimizzare la mobilità urbana e a ridurre gli ingorghi stradali.
- Implementazione di **sistemi di navigazione** GPS e mappe digitali per ottimizzare i percorsi di viaggio

- Utilizzo di sistemi di **gestione della flotta** per monitorare e ottimizzare le operazioni di trasporto, manutenzione ed assistenza.
- **Tecnologie di intelligenza artificiale** e machine learning per migliorare la pianificazione delle rotte e la gestione delle risorse.
- **Miglioramento dell'efficienza** all'interno della catena di fornitura e della logistica.

Il futuro concetto di mobilità dovrà includere iniziative di ricerca che rispondono a combinazioni di più di uno degli aspetti sopra citati (ad es. MaaS e LaaS) che invece sono strettamente collegati tra loro al fine di riempire le lacune derivate da un approccio tecnico e scientifico che separava i temi relativi al mezzo di trasporto, da quelli della fonte di energia, dell'infrastruttura operativa e dai servizi al passeggero o merci passando da un'ottica monomodale ed eterogenea ad una visione integrata, intermodale e resiliente del sistema di trasporti.

GLI SCENARI TECNOLOGICI

I paradigmi tecnici e sociali prima descritti applicati a casi applicativi concreti conducono molto spesso a soluzioni comuni a tutti i mezzi di trasporto in particolare per gli aspetti legati alla digitalizzazione dei servizi di supporto sia per il trasporto passeggeri sia per quello merci. Al contrario, le soluzioni legate all'approvvigionamento energetico per i mezzi di trasporto sia in quantità sia per tipo di energia da fornire e per quanto ha a che fare con le prestazioni del mezzo di trasporto sono specifiche di ogni mezzo in quanto i requisiti tecnici, dimensioni, tratte operative, le potenze in gioco e le condizioni ambientali sono estremamente diverse.

Infine, sono spesso simili le soluzioni legate alla sicurezza ed al comfort dei passeggeri anche se esse vengono integrate in tempi e modi diversi sui vari mezzi di trasporto per questioni di costi e di accettabilità sociale delle conseguenze.

In ragione quindi di questa complessa e multiforme situazione, lo studio Airi offre un'analisi degli scenari tecnologici di sviluppo nel breve medio periodo secondo due diverse prospettive: le linee guida ed i temi tecnologici di pertinenza di ogni

mezzo di trasporto indipendentemente dal fatto se essi siano o meno già citati da altri mezzi di trasporto (descritte di seguito); gli indirizzi tecnologi relativi alle diverse modalità aggregati in aree omogenee di sviluppo comuni ai diversi settori, con una selezione delle principali tecnologie come selezionate dagli esperti Airi (descritte nella sezione scenari tecnologici). Le aree selezionate sono:

1. Mobilità a basse o zero emissioni
2. Nuove infrastrutture aeroportuali / portuali
3. Nuove configurazioni di mezzi di trasporto
4. Digitalizzazione del sistema trasporti
5. Mobilità urbana ed interurbana multimodale e automatizzata
6. Propulsione stradale innovativa
7. Trasporto terrestre delle merci

Scenari per il trasporto su strada

In Europa, il trasporto su strada è la modalità più utilizzata, seguita dal trasporto ferroviario e aereo. La EU ha posto una forte enfasi sull'intermodalità e sulla sostenibilità ambientale del trasporto in particolare su strada, promuovendo politiche per ridurre le emissioni di gas serra e migliorare l'efficienza energetica dei mezzi. Il settore europeo dei trasporti su strada deve affrontare sfide significative a causa dell'evoluzione dei mezzi di trasporto verso una propulsione a basse emissioni, la volatilità dei prezzi del carburante fossile e dei costi delle fonti energia alternative, della concorrenza di produttori non europei con costi più bassi, dalla diversa attitudine sociale all'uso o alla proprietà di un auto o all'uso di trasporti pubblici e condivisi che portano ad una significativa variazione dei ratei produttivi e del tipo, costo e prestazioni dei mezzi di trasporto. A tutto questo per la parte trasporto merci si aggiunge la necessità di una logistica integrata avanzata che tenga conto dello sviluppo dello e-commerce riducendo al contempo l'impatto ambientale che porta a significative modifiche ai sistemi di trasporto merci su strada.

Le auto e gli autobus continuano a essere i principali mezzi di trasporto per spostarsi all'interno delle città e tra le città vicine ma in prospettiva il loro ruolo dovrà

essere integrato a quello delle altre modalità di trasporto, in particolare i treni ad alta velocità sulle tratte a maggiore domanda di traffico o gli aerei per le tratte a più lunga distanza o con minori densità di traffico associate a vincoli orografici importanti, ovvero il trasporto marittimo per le merci. Infine, il traffico stradale può essere congestionato, soprattutto nelle grandi città, e quindi si dovranno perseguire soluzioni di mobilità -sia mezzi di trasporto sia servizi di gestione e controllo- che riducano tempi, costi ed emissioni.

L'evoluzione tecnologica della mobilità stradale di persone e merci richiede capacità di investimenti e relativa gestione manageriale, nuovi parametri di valutazione degli investimenti (per esempio il costo delle emissioni o del riciclo potrebbe essere un fattore rilevante a seconda delle scelte politiche di indirizzo), accorta valutazione dell'accettazione delle nuove tecnologie e coinvolge nuovi operatori extra-settore, in particolare i fornitori delle nuove fonti energetiche e relativi vettori (batterie, celle a combustibile, e-fuel, idrogeno) e delle nuove infrastrutture di servizio adatte alle nuove esigenze. L'evoluzione tecnologica dei trasporti, legata ai cambiamenti dell'organizzazione produttiva (digitalizzazione, nuovi materiali, IA, ecc.) avrà conseguenze di vasta portata sulla produttività, sull'occupazione, sulle competenze, sulla distribuzione del reddito, sulla logistica, sullo stile di vita, sull'ambiente.

Scenari per il trasporto ferroviario

Il trasporto ferroviario è molto sviluppato in Europa quale mezzo di trasporto popolare per viaggiare all'interno dei paesi e tra i paesi confinanti. Le reti ferroviarie ad alta velocità in molti paesi europei offrono un'alternativa comoda e sostenibile ai viaggi in aereo ed al trasporto stradale su distanze intorno ai 500-800 km. In una prospettiva di medio periodo il settore ferroviario sarà una componente integrante della rete industriale europea garantendo collegamenti sicuri e affidabili a ridotto impatto ambientale attraverso l'uso di tecnologie innovative. La EU nei prossimi decenni, si potrà confermare come leader del settore ferroviario per i mercati globali, soprattutto se sarà capace di proporre soluzioni di mobilità

e logistica integrata con tecnologie avanzate. In quest'ottica in ambito ricerca e sviluppo le sfide del settore ferroviario del prossimo futuro sono:

• **Smart cities.** Le ferrovie rappresentano un elemento fondamentale della pianificazione intelligente della città, grazie a sistemi per la gestione della mobilità e dei servizi di consegna. Per esempio, si dovranno realizzare stazioni energeticamente efficienti di interscambio tra tutte le modalità di trasporto.

• **Logistica.** La sfida è rispettare gli ambiziosi obiettivi EU: trasferimento da strada a ferrovia/mare di almeno il 30% entro il 2030 e oltre il 50% entro il 2050. Il trasporto merci su ferro dovrà essere affidabile, puntuale, competitivo ed integrato con altre modalità di trasporto, superando le questioni di interoperabilità con infrastrutture ottimizzate, nuovi servizi per la raccolta dati, gestione, funzionamento e coordinamento del trasporto intermodale.

• **Soluzioni Digitali** per viaggi multimodali. Il settore ferroviario deve concorrere al trasporto door to door favorendo l'interoperabilità con sistemi aperti di prenotazione, assistenza durante il viaggio, pagamento e bigliettazione, comprese le attività di roll-back importanti, qualora una singola transazione dovesse fallire.

• **Treni efficienti e sostenibili.** I passeggeri preferiranno utilizzare il trasporto ferroviario rispetto ad altre modalità se i treni saranno confortevoli, affidabili, disponibili ed accessibili. Allo stesso tempo, il treno deve soddisfare i requisiti delle imprese ferroviarie e degli operatori urbani per offrire servizi di alta qualità e convenienti in termini di costi sia di manutenzione che di acquisto.

• **Infrastruttura.** Le infrastrutture devono essere sicure, affidabili, convenienti e sostenibili per garantire i parametri precedenti. Esse devono includere i sistemi di segnalazione a bordo e di gestione del traffico e della sicurezza, i sistemi di comunicazione treno-terra compatibili ed interoperabili con tutte le altre modalità (es sistemi ERTMS/ETCS di livello II).

Scenari per il trasporto marittimo

Il trasporto navale in Europa è in costante evoluzione, con numerosi porti che operano regolarmente e facilitano il commercio internazionale. Le reti di trasporto navale data la quantità di merci sul totale trattata sono il cardine della catena di approvvigionamento alla base del sistema economico strettamente integrato della EU.

Allo stato attuale, obiettivo prioritario dell'innovazione dei trasporti navali è la ricerca di forme di trasporto ecosostenibili ed efficienti. Essa costituisce una delle grandi sfide per mantenere il primato dell'industria europea del settore nel quadro della concorrenza globale. Anche la ricerca e la diffusione di strategie intelligenti per meglio collegare le diverse forme di mobilità rappresentano elementi chiave per rendere i trasporti navali più puliti, sicuri ed efficienti.

Per il settore marittimo, il quadro complessivo evidenzia una previsione di contributi di grande rilievo dal settore nazionale in cooperazione con i suoi partner europei sulle seguenti sfide:

- **Navi sostenibili** ambientalmente ed energeticamente efficienti richiedono un approccio olistico in grado di integrare l'operato dei costruttori dei mezzi di trasporto, dei sistemi propulsivi, dei fornitori dei sistemi di bordo e dei gestori delle infrastrutture, agendo sulla riduzione degli inquinanti emessi in aria e in acqua nonché sulla corretta gestione di altre fonti d'inquinamento. Rileva a tal fine il sostegno da parte dei settori che producono nuovi combustibili a basso impatto o che si occupano della generazione e trasformazione fino all'immagazzinamento (energy storage) dell'energia che devono fornire soluzioni in qualità e quantità coerenti con le esigenze.

- **I mezzi navali** ad elevato contenuto digitale in grado di rafforzarne l'efficienza, la sicurezza e i servizi a bordo richiedono un 'elevata sensorizzazione e della connettività a bordo, ma anche una stretta interconnessione tra mezzi navali (ship-to-ship), così come tra mezzi e infrastrutture a terra (ship-to-shore). La progettazione navale dovrà quindi considerare il continuo aggiornamento dei mezzi con le più avanzate tecnologie includendo aspetti di cybersecurity e sicurezza del trasporto.

• **Avere mezzi navali autonomi di dimensioni rilevanti** in aree di manovra particolarmente trafficate è una sfida molto significativa. Elemento essenziale è rappresentato dall'integrazione tra sistemi differenti capaci di definire in ogni istante lo stato della nave rispetto all'ambiente esterno, tracciarne le attività e abilitarne la manovra in condizioni di sicurezza. Simili tecnologie dovranno analizzare in tempo reale segnali provenienti dai numerosi sensori, elaborando rapidamente uno scenario di movimento della nave in assenza di controllo umano.

• **Cantieri e siti di produzione a maggiore efficienza**, sicurezza e sostenibilità. Nei prossimi anni, il processo produttivo assumerà un approccio che includa l'intero ciclo di esistenza della nave, dal design fino alla dismissione, con una particolare attenzione per metodologie di progetto, simulazione e di fabbricazione innovative, di semplificazione dell'assemblaggio e delle prove di qualifica dalla fase di concepimento fino alla fase di smaltimento (ship recycling).

• **Nuovi mezzi marini per coprire esigenze specifiche** di estrazione delle risorse offerte dall'ambiente marino. Le nuove frontiere di sviluppo lasciano emergere sfide tecnologiche significative con riferimento alla realizzazione di mezzi in grado di essere impiegati in ambienti particolari (regioni artiche, regioni con condizioni di mare estreme, etc.) o svolgere operazioni complesse in mare aperto (deep-sea mining, etc.).

Scenari per il trasporto aereo

L'aviazione a differenza degli altri settori del trasporto è un mercato intrinsecamente globale con una catena di fornitura globale e regole globali. L'industria aeronautica europea è oggi leader mondiale ma nuovi e paesi stanno sviluppando le capacità di progettare e produrre velivoli e prodotti aeronautici competitivi con un impatto diretto (concorrenza) o indiretto (mercato chiuso) sull'industria europea.

Anche se l'impatto ambientale dell'aviazione è oggi globalmente inferiore rispetto ad altri mezzi di trasporto, l'aeronautica europea lavora per usare energie

sostenibili e persegue l'efficienza energetica per mitigare l'aumento del traffico aereo previsto nei prossimi decenni.
Data l'estrema complessità del prodotto aeronautico e del suo ambiente operativo, l'approccio tecnico richiede un equilibrio tra innovazioni rivoluzionarie e incrementali: le prime sono fondamentali per la competitività, le seconde sono ugualmente importanti per non rendere oltremodo rischioso ogni nuovo progetto. Entrambe devono rispettare gli stringenti requisiti di sicurezza di qualificazione e certificazione riducendo i tempi molto lunghi di introduzione dei miglioramenti che i clienti si aspettano rapidi come in altri settori, anche dei trasporti.

Dal punto di vista dell'**ambiente operativo** le principali linee guida saranno:

- La sicurezza delle operazioni di volo regolate da severi requisiti vanno tradotte in soluzioni efficaci per massimizzare il loro impatto operativo.
- Attività in aeroporto, di manutenzione, di smaltimento affidabili e prevedibili, a costi ottimali e con impatto ambientale minimo.
- Esperienza ottimale dei passeggeri quali elementi qualificanti del trasporto passeggeri, spina dorsale del settore dell'aviazione civile e fattore che contribuisce al suo crescente successo.
- Mobilità senza soluzione di continuità e completa integrazione del trasporto aereo nel sistema di trasporto globale.
- Digitalizzazione e gestione di Big Data che abilita il monitoraggio predittivo del veicolo, migliore connettività dei piloti e passeggeri e scambio dati tra operatori e fornitori di parti.
- Modularizzazione del trasporto merci per una transizione fluida tra mezzi di trasporto di superficie e aerei. Velivoli cargo piccoli o grandi senza equipaggio e automatizzati.

La produzione ed assemblaggio aeronautici, dovrà gestire partner distribuiti su scala globale perseguendo:

- Automazione della produzione ed assemblaggio con soluzioni specifiche adatte ai tassi di produzione e qualità aeronautica proteggendo la proprietà

intellettuale e la sicurezza del prodotto.

- Produzione di parti a basso impatto ambientale: ricambi prodotti dove necessari ma rispettando i criteri di qualità e sicurezza; processi a basso impatto; controlli di qualità e processi capaci di gestire centinaia di migliaia di parti ad alta precisione e costo unitario elevato; controllo della configurazione rispetto al progetto per massimizzare la sicurezza.

La progettazione aeronautica dovrà proporre soluzioni che spaziano dall'architettura del velivolo ai problemi in servizio con i vincoli di complessità e norme di sicurezza, costi e rischi molto elevati ed una catena del valore globale:

- Configurazioni velivolo che bilanciano innovazione e miglioramenti incrementali per mitigare rischi, costi elevati e tempi lunghi derivati dai severi requisiti di certificazione e prestazionali.
- Efficienza energetica per ridurre l'impatto ambientale e garantire la competitività nella propulsione, aerodinamica, sistemi e l'integrazione dell'intero aeromobile.
- Ala e fusoliera. La fusoliera trasportando la maggior parte del carico utile è la vera area di interesse delle compagnie aeree e dei passeggeri. L'ala è fondamentale per la propulsione, riduzione del rumore e per controlli di volo più efficaci.
- Metodi e strumenti di progettazione capaci di gestire le interfacce con i sistemi coinvolti: elevate capacità di elaborazione, gestione di enormi insiemi di data (Big Data), soluzioni AI.
- Processi di integrazione di provenienti da una catena del valore globale garantendo la sicurezza richiesta dalle norme e la compatibilità funzionale e fisica a costi accessibili.
- Tecnologie innovative che migliorano la sicurezza, l'impatto ambientale, la competitività, la funzionalità per cabina di pilotaggio e passeggeri, vano cargo, comunicazioni e gestione dell'energia, carrello di atterraggio, comfort e così via.



SETTORE

TRASPORTI E MOBILITÀ

SCENARI TECNOLOGICI

indice - scenari tecnologici

MEMBRI DEL GRUPPO DI LAVORO **19**

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO **55**

Mobilità aerea 55
Trasporto stradale 56
Trasporto marittimo 57
Trasporto ferroviaro 57
Investimenti in ricerca e innovazione nel settore ferroviario 59

DESCRIZIONI DEGLI SCENARI TECNOLOGICI **61**

N.1 MOBILITÀ A BASSE O ZERO EMISSIONI 63
Mobilità aerea: velivoli elettrici ed ibridi 64
Mobilità aerea e stradale : batterie ad alte prestazioni 65
Mobilità aerea: motori a idrogeno 70
Trasporto terrestre: fuel cell per la propulsione 73
Accumulo di idrogeno e distribuzione 75
Trasporto terrestre: retrofit per alimentazione con GNL dei veicoli 76
Trasporto marittimo: soluzioni per la sostenibilità ambientale ed efficienza energetica 77
Trasporto ferroviario: sistemi energetici innovativi e gestione del ciclo vita 79

N.2 NUOVE INFRASTRUTTURE AEREOPORTUALI/PORTUALI **83**
Mobilità aerea: infrastrutture aereoportuali e stazioni di carica 83
Trasporto marittimo: infrastruttura di comunicazione e connettività a bordo e nave 84
Trasporto marittimo: Logistica del sistema portuale 84

indice - scenari tecnologici

N.3 NUOVE CONFIGURAZIONI DI MEZZI DI TRASPORTO 87
Mobilità aerea: configurazioni del veivolo 87
Mobilità aerea: struttura e sistemi dei veivoli 88
Trasporto marittimo: strutture e architetture dei natanti 88
Trasporto marittimo: nuovi mezzi marini per la Blue Economy 90
Trasporto stradale: Light vehicle 91
Trasporto marittimo: Navi autonome 93

N.4 DIGITALIZZAZIONE DEL SISTEMA TRASPORTI 95
Mobilità aerea: avionica 95
Trasporto marittimo: digitalizzazione e automazione 96
Trasporto ferroviario: digitalizzazione e automazione 97
Trasporto marittimo: Transizione del processo produttivo 99

N.5 MOBILITÀ URBANA E INTERURBANA MULTIMODALE E AUTOMATIZZATA 101
Connettività 104
Mobility as a service (MaaS) 106
Smart Roads 109
Tecnologie di prova ed omologazione, aspetti normativi e valutazione degli scenari operativi 113

N.6 PROPULSIONE STRADALE INNOVATIVA 117
e-Fuels 119
Motori alternativi ad idrogeno (H2_ICE) 119
Split - Cycle - Engine 122
Free Poston Linear Engine 123

N.7 TRASPORTO TERRESTRE DELLE MERCI 125
Tecnologie per il trasporto ferroviario 126
Tecnologie per il trasporto stradale 128

MOTIVAZIONI PER LO SVILUPPO

Mobilità aerea

La mobilità aerea, alla stregua delle altre forme di mobilità, si è fatta carico di azioni atte alla riduzione dell'impatto ambientale. Un'altra sfida della mobilità aerea è il suo inserimento in un ambiente intermodale effettivo su cui siamo in effetti ai primi passi. La sfida è molto complessa essendo il settore altamente globale sia per dimensione industriale, per valore degli investimenti necessari a sviluppare un nuovo prodotto aereo o componente maggiore, sia per uso dei prodotti. La globalità include la catena del valore ed i regolamenti dal punto di vista della sicurezza e degli standard tecnici e riguarda tutto il ciclo di vita dei prodotti aeronautici: dalla produzione all'operatività dei velivoli e la loro riconversione/riutilizzo, così come la gestione/manutenzione e lo sviluppo delle infrastrutture di terra (aeroporti). Gli sviluppi strutturali e tecnologici del futuro devono quindi riguardare diversi aspetti: si va dal miglioramento dell'efficienza nell'uso del carburante alla modernizzazione delle infrastrutture per gestire e distribuire le nuove fonti energetiche, all'approccio alle operazioni ed alla gestione sostenibile del traffico aereo con obiettivo nel lungo termine ad una intermodalità, passando attraverso: la progettazione di aeromobili più efficienti mediante l'utilizzo di materiali innovativi, nuove configurazioni aerodinamiche (come i velivoli tuttala), all'uso di carburanti alternativi più puliti, come il biocarburante o l'idrogeno, l'efficientamento delle procedure di atterraggio e decollo, la scelta delle rotte di volo per ridurre il consumo di carburante e le emissioni ed sviluppare connessione aeree dove esse risultano le più conveniente per tempi ed emissioni, l'adozione di tecnologie avanzate, come aerei ibridi o completamente elettrici oppure con carburanti a basse emissioni di CO_2 come l'idrogeno. Infine, i combinati effetti delle normative -sempre da considerare a livello globale- e delle eventuali decisioni strategiche e politiche sulla mobilità e sul sostegno alla sostenibilità possono influenzare notevolmente l'impatto della mobilità aerea e la dimensione industriale, ad esempio attraverso regole più rigorose sulle emissioni o incentivando la ricerca e lo sviluppo di tecnologie più pulite, ovvero su regolamenti di sicurezza ed incentivi per l'introduzione dei nuovi velivoli o nuove soluzioni.

Trasporto stradale

Per quanto riguarda i trasporti stradale su gomma, diverse iniziative mirano alla decarbonizzazione ed alla gestione della mobilità multimodale ed intermodale. La transizione si rivolge alle propulsioni puramente elettriche per i mezzi stradali più piccoli, mentre per i mezzi pesanti si punta a soluzioni diverse come le fuel cells alimentate ad idrogeno. Per quanto riguarda la intermodalità e multimodalità le attenzioni sono dedicate a sviluppare servizi di supporto e di gestione del traffico. Comunque la transizione comporterà inevitabilmente costi e difficoltà notevoli per le aziende coinvolte; per questa ragione, un riequilibrio modale verso la ferrovia, soprattutto sulle medie e lunghe distanze, potrebbe contribuire ad attenuare l'impatto ambientale e ridurre la congestione.
In ottica più generale, un trasporto terrestre equilibrato e sostenibile dovrebbe necessariamente basarsi sull'utilizzo ottimale di entrambe le modalità stradale e ferroviaria, sfruttando i vantaggi che ciascuna di esse offre: la capillarità e flessibilità del trasporto su gomma dovrebbe combinarsi con la maggiore efficienza e sicurezza del trasporto ferroviario il tutto, come detto, gestito con sistemi di interconnessione efficienti.
Attualmente non è così: il trasporto su gomma è largamente prevalente, persino sulle lunghe distanze dove la razionalità porterebbe a privilegiare il trasporto su ferro mentre la multimodalità e la intermodalità non sono gestite in tutte le loro opportunità
Purtroppo, tutte le analisi prevedono per i prossimi decenni una crescita del volume complessivo di merci trasportate in Europa, ma nessuna variazione sostanziale della ripartizione modale gomma-ferro.
La causa è legata soprattutto ad un'offerta di trasporto ferroviario delle merci inadeguata a soddisfare gli attuali bisogni degli spedizionieri. Le rigidità del sistema ferroviario sono di natura sia tecnica che organizzativa; un salto di qualità richiede uno sforzo notevole di modernizzazione e nuove infrastrutture.

Trasporto marittimo

Gli obiettivi di medio lungo termine del comparto marittimo sono in sintonia con quanto stabilito nel quadro del Green Deal europeo ed a livello internazio-

nale dall'IMO (International Maritime Organisation Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships) e attivano temi di innovazione tecnologica cruciali, legati alla sostenibilità socioeconomico-ambientale del trasporto per le vie d'acqua, marittime e interne, delle merci e delle persone, commerciale e turistico integrandole nel sistema globale del trasporto merci.
La primaria sfida ambientale è inoltre da leggere nel quadro di una stima di raddoppio nei prossimi 30 anni del volume del trasporto su acqua, ed interseca la sfida a livelli superiori di efficienza energetica e gestionale, anche da conseguire con l'accelerazione della digitalizzazione dei processi a bordo e l'automazione della navigazione, senza trascurare la necessità di concepire nuove tipologie di mezzi e l'evoluzione dei prodotti e dei processi produttivi verso nuovi materiali e soluzioni che massimizzino il riciclo-riuso e minimizzino l'impronta carbonica.

Trasporto ferroviario

L'Europa è dotata di una rete ferroviaria capillare che costituisce un patrimonio da preservare e valorizzare. Tuttavia, è necessario migliorare l'integrazione tra i sistemi ferroviari dei diversi paesi europei, allo scopo di migliorare l'efficienza e la competitività oltre che la sua connessione con i trasporti stradali in primis e poi con gli altri mezzi di trasporto. La situazione è ancora diversa in altri continenti per ragioni orografiche e distanze o densità di popolazione il che comporta la necessità di adattamenti significativi per esportare le soluzioni integrate EU nel mercato mondiale. Accanto agli sviluppi tecnologici, il settore necessita di maturare la comprensione sia delle mutevoli tendenze del mercato dei trasporti e dei loro fattori determinanti, che influiscono sulla domanda di servizi ferroviari, sia dei processi di autorizzazione, standardizzazione e regolamentazione che dovranno essere adeguati al fine di garantire tempestività in relazione all'innovazione creata. Il concretizzarsi della digitalizzazione e dell'automazione permetteranno di avere sistemi ferroviari basati su treni a composizione ridotta ma più frequenti e in grado di accoppiarsi virtualmente, approdando poi alla mobilità condivisa multimodale con soluzioni pienamente integrate con altri modi di trasporto attraverso stazioni che fungeranno da "hub di mobilità".

Un sistema ferroviario digitale pienamente connesso e integrato permetterà una gestione efficiente delle risorse, incrementando la qualità delle operazioni, la resilienza, la capacità di trasporto e la sicurezza favorendo la mobilità integrata end-to-end per passeggeri e merci, permettendo la creazione di nuovi servizi e accrescendo quindi l'attrattività del sistema. La digitalizzazione porterà un beneficio diretto sui costi: digitalizzare le attività di ingegneria, esercizio e manutenzione ridurrà l'onere economico complessivo del sistema. L'impiego del gemello digitale del sistema veicolo-infrastruttura e le tecniche di autorizzazione virtuale ottimizzeranno il "time to market". L'ottimizzazione tecnica ed economica della manutenzione si raggiungerà grazie a metodologie di ispezione non invasive o di manutenzione predittiva basata sui big data e sull'internet delle cose e altri dispositivi intelligenti.

Le operazioni di trasporto merci automatizzate apporteranno ulteriore prevedibilità e versatilità al servizio, favorendo un aumento della capacità e della resilienza del sistema merci su ferro; per quanto riguarda il trasporto passeggeri, invece, si potrà incrementare la domanda sulla base delle richieste pervenute in tempo reale, migliorando la flessibilità del servizio. La gestione in tempo reale del servizio e/o della manutenzione, integrata ai concetti innovativi come l'accoppiamento virtuale e il platooning[1], supporteranno l'aumento della flessibilità nel servizio e nella gestione del traffico anche in presenza di guasti e criticità su veicoli e infrastrutture e delle operazioni logistiche. L'uso di IA a bordo permetterà aumentare l'incremento della sicurezza in soluzioni autonome di guida: si pensi al monitoraggio del macchinista, dove soluzioni innovative rispetto al tradizionale "uomo morto" possono essere implementate in modo facile ed efficace, risultando flessibili soprattutto in ambito merci, dove l'IA, attraverso il rilevamento degli oggetti, permetterebbe delle soluzioni logistiche d'avanguardia.

[1]Il Truck platooning -che letteralmente significa "plotone di camion" - si riferisce a un convoglio automatizzato di mezzi pesanti che viaggiano a breve distanza, grazie a sistemi di guida avanzati. Ha le potenzialità per rivelarsi una situazione più economica e rapida e ottenere maggiore efficienza e sostenibilità

INVESTIMENTI IN RICERCA E INNOVAZIONE NEL SETTORE FERROVIARIO

Gli investimenti pubblici nelle infrastrutture, provenienti dagli strumenti di finanziamento dell'UE, come gli investimenti della BEI, il CEF e il programma TEN-T, nonché da quelli nazionali consentiti nel quadro degli aiuti di Stato, hanno avuto un impatto positivo sulla competitività globale della settore ferroviario europeo e contribuito a stimolare la domanda di prodotti.

Tuttavia, esiste ancora un margine significativo per ulteriori investimenti volti a soddisfare le ambizioni delineate nei piani industriali degli stakeholder ferroviari, o della visione delle ferrovie al 2050 (espressa dal Libro bianco sui trasporti, dal TEN-T e dal SERA). Pertanto, la competitività del settore non ha ricevuto un sostegno ottimale sotto forma di investimenti in infrastrutture pubbliche da parte di tutti i governi nazionali. Ciononostante, il settore è riuscito a mantenere una posizione di leadership a livello globale grazie a varie iniziative legate alla creazione di ricerca, sviluppo e innovazione, come ad esempio attraverso il programma Shif 2 Rail.

Ad oggi, visti i risultati positivi si è declinato quel supporto nella partnership Europe's Rail, con un budget di 1.2 miliardi di euro da investire in progetti di ricerca e sviluppo. Questo investimento in innovazione è assolutamente importante alla luce degli investimenti significativi in corso in altri paesi, come ad esempio in Cina. Le iniziative nel campo della digitalizzazione aiuteranno l'impresa ferroviaria a mantenere la posizione di leadership di mercato nel prossimo futuro. Anche la sollecitazione del mercato interno, attraverso la concorrenza e gli appalti pubblici sulla base del miglior rapporto qualità-prezzo o delle offerte economicamente più vantaggiose, rappresenta uno strumento per mantenere le ferrovie europee all'avanguardia. Infine, PNRR e programmi di ricerca finanziati dall'UE sono strumenti essenziali che forniscono il quadro per facilitare il mantenimento della leadership da parte delle ferrovie.

Tuttavia, è importante evidenziare come, sebbene la ferrovia sia più sostenibile rispetto al trasporto su strada, la sua quota di mercato è ancora molto bassa, soprattutto in ambito merci. Nel 2019, la ferrovia rappresentava il 17,6% del trasporto interno di merci dell'UE, mentre la strada il 76,3%. Si prevede comunque che il mercato avrà uno sviluppo positivo nel medio e lungo termine, con un tasso di crescita medio annuo del 2,3% fino al 2025, e che il volume totale del mercato raggiungerà i 204 miliardi di euro entro il 2025. Questo nonostante il trasporto ferroviario sia intrinsecamente complesso dal punto di vista economico, con un mix di asset pubblici e privati, funzioni commerciali e di servizio pubblico, operazioni pubbliche e private.

La globalizzazione economica dovrebbe facilitare l'introduzione di nuove tratte e reti ferroviarie, spingendo quindi gli investimenti. Per gli asset ferroviari mobili è sicuramente più facile attrarre finanziamenti.

A livello nazionale, invece, il PNRR sta permettendo un'accelerazione all'innovazione nella mobilità. In Italia, a livello infrastrutturale, infatti, la misura ha allocato circa 57 miliardi di euro (di cui 34,6 miliardi in nuovi progetti) per accelerare lo shift modale in favore del ferro, e altri 25,33 miliardi per le infrastrutture dedicate alla mobilità sostenibile (di cui 14,13 miliardi in nuovi progetti). Nello specifico, la terza Missione del programma ha disposto una serie di investimenti (da 25,4 miliardi) finalizzati allo sviluppo di una rete di infrastrutture di trasporto moderna, digitale, sostenibile e interconnessa, che possa aumentare l'elettrificazione dei trasporti e la digitalizzazione, e migliorare la competitività sul mercato. Tali finanziamenti sono volti al completamento dei principali assi ferroviari ad alta velocità e alta capacità, all'integrazione fra questi e la rete ferroviaria regionale e alla messa in sicurezza dell'intera rete ferroviaria. Infine, grazie alla centralità del progetto Ponte sullo Stretto, nell'ambito del Corridoio Scandinavia-Mediterraneo delle merci e della Rete Transeuropea di Trasporto (TEN-T), questa grande opera avrà ricadute positive anche sulle infrastrutture ferroviarie del Sud. Qui il Gruppo FS investirà nei prossimi dieci anni 80-90 miliardi di euro per il potenziamento e l'ammodernamento della rete esistente, con impatti notevoli sia dal punto di vista del traffico passeggeri che da quello delle merci.

DESCRIZIONE DEGLI SCENARI TECNOLOGICI

N. 1 MOBILITÀ A BASSE O ZERO EMISSIONI

Il Green Deal europeo richiede una riduzione del 90% delle emissioni di gas serra dai trasporti, affinché l'UE diventi un'economia a impatto climatico zero entro il 2050, limitando il più possibile le occasioni di inquinamento. Tutte le modalità di trasporto sono indispensabili ed è per questo che devono migliorare la loro impronta ambientale, diventando più sostenibili. Tale orientamento incontra il favore dei passeggeri che tendono a scegliere la modalità più sostenibile come appare da recenti studi ed analisi. Ciò implica che devono essere introdotte apposite misure per ridurre significativamente l'attuale dipendenza dai combustibili fossili (sostituendo le flotte esistenti con veicoli a basse e zero emissioni).

Il conseguimento progressivo entro il 2050, in uno scenario di crescita dei traffici, dell'obiettivo zero o 'near-zero' per l'impatto ambientale climalterante del sistema dei trasporti globali è la motivazione primaria per l'introduzione nel medio termine di tecnologie migliorative e lo sviluppo in ottica di lungo periodo di soluzioni di innovative di cambio di paradigma.

La filiera energetica, in questo quadro, rappresenta l'ambito primario di indagine per la progressiva sostituzione della fonte primaria fossile con combustibili/vettori energetici alternativi, per i quali gli studi si concentrano sui sistemi di contenimento/immagazzinamento, sugli impianti di generazione, i sistemi di accumulo. Le tecnologie più promettenti sono attualmente quelle legate a biocombustibili (ammoniaca, metanolo, ecc.) e all'idrogeno, oltre alla soluzione elettrica o ibrida per i mezzi più piccoli. In parallelo, sono oggetto di indagine, per il miglioramento della flotta esistente, tecnologie e sistemi di contenimento/cattura delle emissioni in aria e acqua (SOx, NOx, CO_2, particolato), ...

Invece per quanto riguarda il miglioramento dell'efficienza energetica dei mezzi di trasporto, risultano essenziali le ricerche effettuate in ambito di:

- architetture energetiche intelligenti, anche con capacità di accogliere fonti energetiche distribuite;
- sistemi di distribuzione e stivaggio dell'energia a bordo dei mezzi di trasporto (superconduttori, smart e DC grid, serbatoi idrogeno e batterie, etc.);
- recuperi energetici, anche da sorgenti di calore; soluzioni di eco-design;

- sistemi di automazione e controllo per la gestione dell'energia a bordo e del mezzo di trasporto nel suo complesso di conseguenza.

Mobilità aerea: velivoli elettrici ed ibridi

La transizione verso motori elettrici e ibridi consente una migliore efficienza dal punto di vista energetico e genera meno emissioni localmente rispetto ai motori a combustione interna tradizionali. Velivoli elettrici come droni, aerotaxi, velivoli multi-rotore (eVTOL), e Personal Air Vehicles (PAV) sono su un percorso di che, secondo le previsioni di settore, li porterà ad essere sempre più comuni. Essi dovrebbero essere più efficienti dal punto di vista energetico e generano meno emissioni (CO_2 e NOx) localmente rispetto ai velivoli con motori a combustione interna.

Si è intrapreso anche uno sfidante percorso per lo studio di configurazioni velivolo ibridi o totalmente elettrici di maggiori dimensioni (50-100 posti) capaci di coprire in modo rapido distanze fino a 500-800 km tipiche del trasporto regionale o a breve raggio utili per le tratte non coperte dal trasporto ferroviario o stradale per densità di traffico, costi infrastrutturali, problemi orografici o necessità di connessione rapida e frequente. L'introduzione in servizio di questi nuovi velivoli è prevista entro i prossimi 5 anni per quelli di piccola dimensione mentre i più grandi di dimensione regionale potranno avere un'entrata in servizio intorno al 2035 con un impatto industriale elevatissimo in quanto richiedono un profondo cambiamento non solo della configurazione del velivolo ma anche della catena del valore in quanto le tecnologie da integrare sono sostanzialmente diverse da quelle attuali. L'impatto socioeconomico è altrettanto elevato sia per le ripercussioni sulla mobilità, sulle infrastrutture e per la necessità di emettere nuove normative necessarie a fare funzionare in modo sicuro ed ordinato questi nuovi velivoli. Tutto questo è oggi incluso nelle iniziative di ricerca EU e nazionali anche se non ancora in quelle normative e di standardizzazione ne è alle viste un pari sforzo a livello globale. Gli investimenti per arrivare ad velivoli elettrici o ibrido-elettrici con una maturità di TRL 7 sono nell'ordine dei 20-30 M€ per i velivoli di piccola dimensione ma arrivano alle centinaia di M€ per quelli regionali.

Mobilità aerea e stradale: batterie ad alte prestazioni

Lo sviluppo di batterie avanzate è abilitante essenziale per raggiungere la neutralità climatica del trasporto stradale (insieme alle fuel cell ed agli e-fuel) e di quello aereo (almeno per i velivoli fino a 100 posti) e prolungare l'autonomia dei mezzi di trasporto elettrici o ibridi fino a 1000 km nel caso stradale e fino a 500 km nei velivoli ibrido elettrici regionali ad elica. Le batterie devono avere una densità energetica elevata, il che significa che devono essere in grado di immagazzinare molta energia in rapporto al loro peso e volume fattore cruciale per garantire che le batterie possano alimentare il mezzo di trasporto per un'adeguata autonomia. In particolare, il loro peso è critico nell'aviazione, poiché ogni chilogrammo aggiunto comporta un aumento del peso della struttura e dei volumi del velivolo e quindi consumo energetico maggiore e una riduzione dell'autonomia. Le batterie devono essere leggere ma allo stesso tempo resistenti per sopportare le vibrazioni e le forze aeree durante il volo, inoltre devono essere progettate per essere sicure -di nuovo nel caso del trasporto aereo con standard molto severi propri sostanzialmente diversi da quelli del settore del trasporto stradale (surriscaldamento, esplosione, emissione sostanze pericolose)- e devono essere dotate di sistemi di monitoraggio avanzati ed in grado di sopportare un elevato numero di cicli di carica-scarica senza degradarsi rapidamente. La durata della batteria è un fattore critico, specialmente se consideriamo l'uso intensivo dei velivoli. La capacità di caricare rapidamente le batterie è importante per minimizzare i tempi di inattività ed operabile con continuità il mezzo di trasporto. Le tecnologie di ricarica rapida stanno avanzando, ma devono essere implementate in modo sicuro. Le batterie agli ioni di litio sono tra le più comunemente utilizzate, ma ci sono anche ricerche in corso su altre tecnologie, come le batterie al litio-solfuro o le batterie a stato solido, che potrebbero offrire prestazioni migliori. Attualmente, le batterie ad alte prestazioni per velivoli possono essere costose. Ridurre i costi è cruciale per rendere l'aviazione elettrica più accessibile. Infine, l'impatto delle batterie sarà in particolare elevato sia per le ripercussioni sulle infrastrutture di carica e smaltimento e dovrà prevedere sistemi dedicati di recupero delle materie prime ovvero processi per dare una "seconda vita", magari in condizioni operative meno pesanti, alle batterie usate nei mezzi di trasporto.

La disponibilità di batterie per mezzi di trasporto a propulsione ibrida o elettrica dovrà accompagnare per tempi e prestazioni l'introduzione in servizio dei mezzi di trasporto prima delineata tenendo conto delle specifiche necessità e adattamenti alle specifiche condizioni operative, ambientali, regolamentari dell'applicazione specifica. Per esempio, le batterie per uso aeronautico saranno diverse da quelle per uso stradale su automobili e ancora diverse da quelle per veicoli pesanti da trasporto in termini di densità di potenza, condizioni operative, tempi di ricarica e condizioni di sicurezza da rispettare. Gli investimenti per arrivare ad un TRL 7 con batterie adatte alla specifica esigenza a partire da una soluzione di base comune sono nell'ordine dei 10-20 M€ per ogni singola tecnologia avanzata cui aggiungere i costi di industrializzazione e produzione. Al contrario lo sviluppo delle singole tecnologie chimiche, di packaging o di controllo delle batterie richiede investimenti dell'ordine delle centinaia di milioni di € per ogni filone come mostrato dagli ingenti investimenti previsto nella iniziativa EU Batt4EU dotata di ben 800 M€ di finanziamento.

BATTERIE AGLI IONI DI LITIO

Le batterie agli ioni di litio (Lithium-ion Battery - LiB) hanno avuto una rapida ascesa sul mercato grazie alle maggiori prestazioni fornite rispetto alle batterie già presenti sul mercato, come le batterie al piombo, Nichel-Cadmio (Ni-Cd) o le nichel metallo idruro (Ni-MH). L'elevato contenuto energetico che le LIB riescono a raggiungere, in termini di densità energetiche (Wh/L) e capacità (Wh/kg), consente l'abbattimento delle emissioni in settori finora considerati difficili da elettrificare. Il settore dell'automotive, ad oggi, risulta il principale settore di applicazione delle LIB, seguito da altre applicazioni come i dispositivi elettronici portatili (smartphone, laptop, telecamere, droni, etc;)

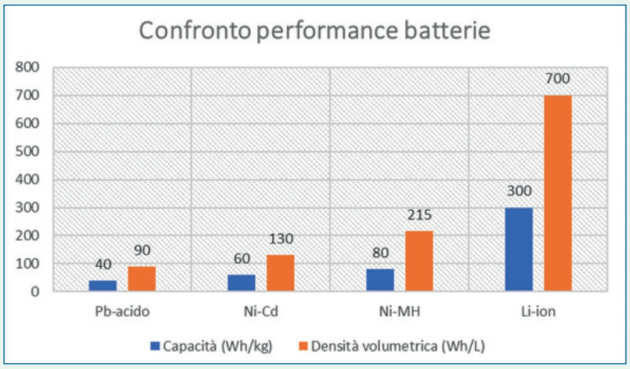


Figura 1: Confronto delle densità energetiche (Wh(L) e gravimetriche (Wh/kg) per diverse tipologie di batterie. I valori riportati si riferiscono a densità energetiche di pacchi batterie in commercio

Gli studi in corso non riguardano esclusivamente le componenti delle batterie, ma anche la produzione industriale delle batterie, la gestione del pacco batterie e la dissipazione del calore.

Quest'ultimo aspetto è di primaria importanza per la conservazione, salvaguardia e sicurezza delle batterie. Molti studi e miglioramenti hanno riguardato anche la gestione del calore del pacco batterie delle vetture elettriche, in quanto uno dei principali rischi è il rischio di incendio dovuto al fenomeno chiamato thermal runaway, per il quale un eccessivo aumento della temperatura delle batterie porta all'ignizione dell'elettrolita, che essendo costituito da composti chimici volatili e infiammabili genera una reazione a catena provocando l'incendio dell'intero pacco batterie.

L'insieme degli studi condotti sulle batterie ha consentito un costante miglioramento delle prestazioni, permettendo la vendita di vetture elettriche con autonomie sempre più elevate e chilometraggi anche superiori a 500 km, oltre che con elevati livelli di sicurezza e costi sempre inferiori.

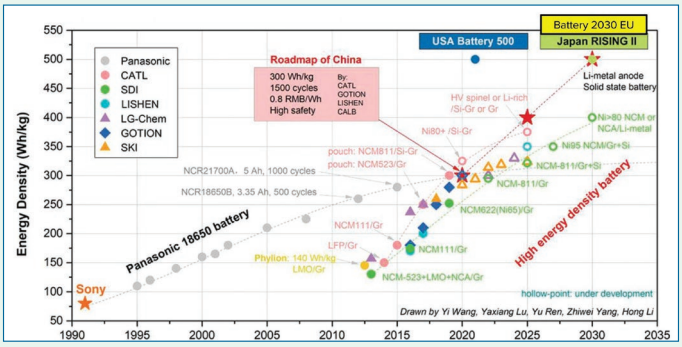


Figura 2: Evoluzione della densità energetica delle batterie LIB dal 1990 ad oggi e prospettive di crescita future (Fonte: The Battery Report 2022 - Volta Foundation)

Se da una parte l'elettrificazione sta consentendo di ridurre le emissioni di gas serra, dall'altra studi recenti hanno mostrato che l'impiego di batterie ha un forte impatto ambientale, legato per il 40%-60% alla produzione delle batterie. Infatti, la produzione dei materiali elettrodici implica l'estrazione delle materie prime, il loro trasporto e i trattamenti di raffinazione. Gli studi hanno evidenziato che il mix di fonti energetiche utilizzate per la produzione delle batterie ha un forte contributo sulle emissioni.

Riguardo il fine vita delle batterie, al momento si stanno sviluppando e industrializzando processi di riciclo particolarmente efficienti. e ci si aspetta che negli anni avvenire venga realizzato un apposito sistema per la raccolta, il riciclo e lo smaltimento delle LIB, anche grazie alla spinta proveniente dal crescente numero di batterie da riciclare.

Tendenze future

É ormai chiaro che la lotta al cambiamento climatico è basata sull'elettrificazione dei principali settori industriali, coinvolgendo in parte o completamente i sistemi di stoccaggio di energia elettrochimici, di cui le batterie agli ioni di litio sono la principale tecnologia. Le LIB stanno consolidando la loro posizione sul mercato,

che grazie alla produzione di massa sta permettendo una costante diminuzione del prezzo, riuscendo così a sostenere le grandi variazioni di prezzo dei costituenti delle batterie.

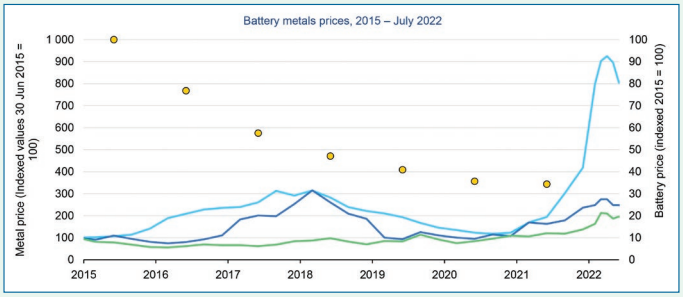


Figura 3: Il prezzo delle batterie ha registrato un costante decremento negli anni, pur con delle variazioni considerevoli nei prezzi delle materie prime (Fonte: IEA - Global supply chains of EV batteries)

Per quanto le batterie al litio continueranno a popolare il mercato automotive e applicazioni stazionarie, nei prossimi anni si prevede che altre tipologie di batterie accompagnino le LIB nel processo di elettrificazione.

- Fra 5 o 10 anni si prevede un significativo balzo in avanti grazie alle batterie agli ioni di sodio (Sodium-ion Battery - SIB), le quali si differenziano dalle LIB per la presenza di ioni sodio al posto di quelli di litio. Le SIB offriranno densità energetiche pari a quelle delle LIB, ma con costi molto ridotti grazie all'utilizzo di elementi abbondanti in natura, tra cui ferro, sodio e alluminio. Le SIB potrebbero offrire un'opportunità particolarmente vantaggiosa per la EU, poiché molti degli elementi necessari alla produzione delle SIB risultano essere abbondanti in Europa.

- Alle batterie al sodio si aggiungeranno nei prossimi 10/20 anni le batterie allo stato solido (Solid-State Battery - SSB), che si differenziano dalle LIB per l'impiego di un elettrolita solido che consente di raggiungere densità energetiche molto superiori. Mentre le batterie agli ioni di sodio sembrano essere alle porte del mercato automotive, le SSB sono ancora in fase di sviluppo sperimentale.

Mobilità aerea: motori a idrogeno

L'idrogeno è un elemento chimico molto abbondante nell'universo, ma non si trova comunemente in forma libera sulla Terra ed è spesso legato ad altri elementi come l'ossigeno (ad es. H_2O). Per utilizzare l'idrogeno come combustibile / fonte energetica è necessario separarlo da altre sostanze in un processo noto come produzione di idrogeno. I motori ad idrogeno possono funzionare attraverso la combustione diretta dell'idrogeno o tramite una cella a combustibile. Nella combustione diretta, l'idrogeno viene miscelato con l'ossigeno atmosferico e bruciato per produrre energia sotto forma di calore ed emissione di vapore acqueo, che può essere utilizzata per generare potenza meccanica, mentre la cella a combustibile, converte l'idrogeno e l'ossigeno in acqua, generando contemporaneamente elettricità e calore. In entrambi i casi non si produce CO_2 ma possono contenere NO_x e producono H_2O i cui effetti sul clima e sull'atmosfera sono allo studio dal punto di vista meteorologico e di riscaldamento globale (H_2O) e sulla salute (NO_x). Oltre questo aspetto di impatto ambientale e sociale le sfide principali associate all'uso dell'idrogeno come combustibile riguardano:

- La produzione di idrogeno richiede energia, che può oggi provenire da fonti fossili o rinnovabili. In prospettiva la produzione di idrogeno dovrà essere da fonti rinnovabili, cioè a basse emissioni di CO_2 per essere davvero efficace sulla sostenibilità ambientale del trasporto aereo.
- L'immagazzinamento e la distribuzione dell'idrogeno possono essere complessi, poiché l'idrogeno ha una bassa densità energetica ed è difficile da comprimere o liquefare.
- La sicurezza è importante, poiché l'idrogeno è altamente infiammabile e l'impiego negli aeromobili richiede accorgimenti sia a livello di operazioni ground che per il corretto e sicuro immagazzinamento e la gestione a bordo.
- La necessità di rivedere in maniera profonda la configurazione dei velivoli per la necessità di serbatoi con volumi superiori rispetto a quelli attualmente in uso stante la molto minore densità energetica.

In tale contesto è di grande rilievo l'attività di sviluppo di motori ad idrogeno sia con combustione sia con fuel cell sviluppata nella partnership europea Clean Aviation che stanno testando entrambi i tipi di motore a scala significativa e pianificano prove a scala reale entro il 2030.



Figura 4: Velivolo ad idrogeno H2FLY GmbH (E.J. Adler e J.R.R.A. Martins, 2023)

LA TECNOLOGIA DELLE CELLE A COMBUSTIBILE PEM

Le celle a combustibile a elettrolita polimerico (PEMFC) sono dispositivi ad alte prestazioni utilizzati per convertire l'energia chimica dell'idrogeno in energia elettrica; tali dispositivi sono stati dimostrati utili nel settore dei trasporti, e in particolare per il trasporto gommato, navale e ferroviario.

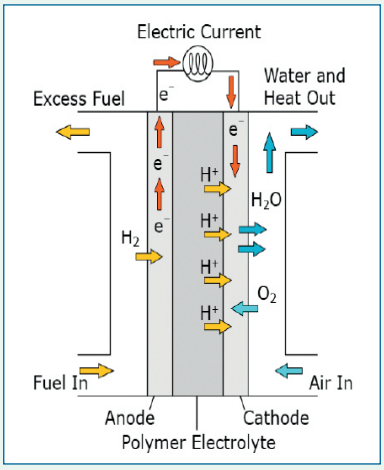


Figura 5: EVelivolo ad idrogeno H2FLY GmbH (E.J. Adler e J.R.R.A. Martins, 2023)

Il powertrain di un sistema di trasporto a fuel cell è composto da un motore elettrico, un sistema di gestione della potenza, un inverter bidirezionale che regola la tensione in ingresso o in uscita dalla batteria, un convertitore che regola la tensione in uscita dal sistema fuel cell per accoppiarlo alla tensione del pacco batterie, e un serbatoio di idrogeno ad alta pressione connesso al sistema fuel cell.Le celle a combustibile utilizzate nel settore dei trasporti sono soprattutto di tipo PEMFC, ovvero basate su membrane a scambio protonico. Tali sistemi offrono elevata densità di potenza ed efficienze elettriche che si avvicinano al 60%. Si basano sull'utilizzo di membrane perfluorurate. Richiedono un'elevata purezza dell'idrogeno in ingresso a bassa pressione (< 1,5 – 3 bar) e garantiscono un adeguato comportamento dinamico sia in termini di risposta rapida che di intervallo di carico. La membrana perfluorurata determina un ambiente acido che richiede l'utilizzo di metalli nobili come catalizzatori, in particolare il platino (Pt). I piatti bipolari e gli strati diffusivi possono essere costituiti da grafite, materiali carboniosi o titanio (Ti). Le PEMFC hanno una densità di potenza di 1 W/cm2 (area attiva), costi capitali di 900-2100 €/kW, durata 20.000 ore, contenuto di metalli nobili < 0.3 g/kW ed efficienza elettrica prossima al 60%.

Trasporto terrestre: fuel cell per la propulsione

Per il trasporto stradale le fuel cells (FC) offrono maggiori vantaggi per mezzi pesanti e lunghe percorrenze. I camion a celle a combustibile sono un potenziale sostituto immediato dei camion diesel, in quanto possono essere riforniti in pochi minuti e possono raggiungere un'autonomia di centinaia di chilometri. I settori più promettenti sono gli autocarri pesanti a lungo raggio per applicazioni logistiche, i pullman e gli autocarri per la raccolta dei rifiuti. Tali sistemi sono in una fase avanzata di dimostrazione e in alcuni casi sono state avviate campagne per la diffusione su larga scala. I veicoli Toyota Mirai, Honda Clarity e Hyundai Nexo sono esempi concreti di auto a celle a combustibile alimentate a idrogeno già introdotte nel mercato da diversi anni. In Europa si sviluppano veicoli FC per la movimentazione dei materiali (HyLIFT EUROPE e FCLIFT), autobus FC (3EMOTION, JIVE e JIVE2) e - in misura minore - le autovetture FCEV (H2ME, H2ME2 e ZEFER) sono state sviluppate e dimostrate con successo.

Nel settore navale, le celle a combustibile sono state dimostrate come alimentazione ausiliaria su diverse applicazioni, dai sommergibili alle piccole imbarcazioni costiere, provando la fattibilità della tecnologia su piccola scala. La filiera europea dell'idrogeno e delle celle a combustibile sta incrementando il suo interesse per il trasporto navale, con cooperazioni formali e joint venture tra i produttori di FC e alcuni fornitori di sistemi di alimentazione marittima e integratori di sistemi. Sono in corso progetti dimostrativi per evidenziare la fattibilità dell'idrogeno per alimentare le navi utilizzando FC e motori a combustione modificati. Per alcuni tipi di utilizzo (navi da navigazione interna e piccole navi costiere) e per le navi da crociera, i sistemi FC rappresentano un'opzione promettente e a emissioni zero per fornire energia quando questi mezzi sono attraccati in banchina. Recentemente sono stati finanziati progetti di navi da carico più grandi, ma le navi su scala commerciale sono in fase di studio progettuale.

Per quanto riguarda il settore ferroviario, la maggior parte dei treni che circolano oggi sono alimentati a diesel o elettrificati tramite linee aeree. La propulsione

elettrica a batteria può trovare applicazione per i treni passeggeri che operano su distanze più brevi, ma l'idrogeno offre una portata più lunga e numerosi vantaggi rispetto alle locomotive elettriche a pantografo che utilizzano linee aeree: ad esempio, libertà di movimento delle locomotive e infrastruttura ferroviaria di ridotte proporzioni. L'idrogeno è una tecnologia abilitante fondamentale per la decarbonizzazione del trasporto ferroviario, in quanto può fornire la soluzione più conveniente per alcune linee che sono ancora gestite con treni diesel, rinnovando le unità diesel o sostituendo i treni esistenti con nuovi treni alimentati a idrogeno. L'Europa ha una posizione di leadership nell'integrazione e nell'assemblaggio di treni FC, la fornitura di infrastrutture su larga scala e la regolamentazione per consentire l'uso dell'idrogeno nelle ferrovie:

- Il treno Alstom iLint FC è predisposto con una Fuel Cell da 400 kW e un'autonomia massima di 1.000 km.
- Siemens sta lavorando per il proprio treno Mireo, e ha avviato piani per convertire le locomotive merci in modo che utilizzino l'idrogeno (ad esempio, nelle ferrovie lettoni).
- Il treno FLIRT H2 alimentato a idrogeno di Stadler dovrebbe essere introdotto nel 2024.

La disponibilità di fuel cell è a breve termine, da 1 a 3 anni. Tuttavia, anche l'impatto industriale sarà rilevante causa le modifiche richieste ai veicoli per incorporare la nuova propulsione e le ripercussioni sulle infrastrutture di ricarica dell'idrogeno, prevalentemente gassoso a differenza del caso aeronautico, e per il suo stivaggio a bordo o presso le stazioni di ricarica nonché della normativa di sicurezza e standardizzazione tecnica. Lo sviluppo di FC avanzate è oggi incluso nelle iniziative di ricerca EU come la partnership Clean Hydrogen e nazionali. Gli investimenti per arrivare ad un TRL 6 di fuel cell adeguate e di dimostratori a scala reale di veicoli sono nell'ordine dei 20-100 M€ per ogni dimostrazione.

Accumulo di idrogeno e distribuzione

Nel prossimo futuro è previsto un aumento esponenziale dell'uso dell'idrogeno verde nel settore dei trasporti. L'accumulo di idrogeno consente una continuità di distribuzione e offrirà una soluzione ottimale per il nuovo sistema energetico, anche con riferimento alle direttive europee di contemporaneità di produzione di energia rinnovabile (prelevata dalla rete) e idrogeno verde.
Tuttavia, le tecnologie di stoccaggio di idrogeno più mature e facilmente implementabili di idrogeno liquido e idrogeno compresso possono comportare, in assenza di adeguate misure, rischi per la sicurezza di persone e cose, soprattutto in condizioni di elevate capacità e pressioni operative. Soluzioni tecnologiche di storage/trasporto di idrogeno che riducano questi rischi sono in via di sviluppo.

• Per il settore dei trasporti su gomma ed anche nel caso dell"uso in aviazione è necessaria una fase dimostrativa che evidenzi la maturità delle tecnologie di stoccaggio e distribuzione dell'idrogeno a partire dalle stazioni di rifornimento (HRS) in zone densamente popolate, oppure -caso degli aeroporti- regolamentati da severe norme di sicurezza, così come lo stoccaggio e la distribuzione di idrogeno in territori remoti, come le isole, che possono usufruire di fonti energetiche rinnovabili intermittenti (fotovoltaico, eolico, etc.). Nel caso dell'aviazione è da considerare che le soluzioni criocompresse di liquefazione dell'idrogeno saranno prevalenti date le quantità di idrogeno da trattare e la necessità di ridurre il volume dei serbatoi a bordo dei velivoli.

• Per il settore ferroviario, anche se l'Europa ha assunto una posizione di leadership nell'integrazione e nell'assemblaggio di treni con celle a combustibile, grazie alle innovazioni introdotte da Alstom e Siemens, è in corso la progettazione di nuovi dispositivi di stoccaggio dell'idrogeno a bordo, come l'idrogeno criocompresso o l'idrogeno liquido.

• Per il settore dei trasporti navali, la creazione di una rete di distribuzione e rifornimento nei porti e lungo le vie d'acqua interne in Europa sarà fondamentale

per l'introduzione su larga scala dell'idrogeno, così che fornisca un servizio fruibile sia dal trasporto marittimo che dalla navigazione interna. Per facilitare l'aumento dell'uso dell'idrogeno, sarà quindi necessario realizzare soluzioni di bunkeraggio sicure e flessibili per i diversi segmenti del trasporto navale.

In tutte le applicazioni dovranno essere sviluppate norme, regolamenti, standard tecnici e procedure per il trasferimento dell'idrogeno a bordo delle navi e all'interno delle infrastrutture installate nei porti, aeroporti, stazioni e stazioni di servizio lungo le strade, in particolare nel caso di idrogeno liquido, al fine di garantire che le i mezzi di trasporto possano essere riforniti in modo sicuro sia per le infrastrutture che per l'ambiente e la popolazione circostante.
Lo sviluppo di soluzioni e sistemi di accumulo dell'idrogeno liquido e gassoso ad alta pressione per le stazioni di fornimento e per i mezzi di trasporto è oggi incluso nelle iniziative di ricerca EU come la partnership Clean Hydrogen e nazionali. Gli investimenti per arrivare ad un TRL 6 con dimostratori a scala reale sono nell'ordine dei 30 M€ per ogni dimostrazione.

Trasporto terrestre: retrofit per alimentazione con GNL dei veicoli

Il retrofit dei veicoli esistenti, senza quindi produrne di nuovi con costi ambientali e finanziari considerevoli, può essere ottenuto grazie all'uso del GNL (gas naturale liquefatto), che produce emissioni molto inferiori rispetto al gasolio. Un mezzo pesante o anche un'auto euro 5 o 6 può essere facilmente adattato e reso bifuel (gasolio-GNL). Le maggiori necessità di investimento in questo settore riguardano l'infrastruttura di approvvigionamento e di distribuzione del combustibile.
La tecnologia è già disponibile e quindi i tempi di implementazione possono essere molto rapidi o immediati anche grazie ad una parte regolamentare e normativa già disponibile. Invece, nel caso di una estesa adozione di questa soluzione, restano da mettere a punto e rendere disponibili un'adeguata rete di approvvigionamento e distribuzione del GNL a scala molto superiore a quella attuale che oggi copre una piccola nicchia. La soluzione non è oggi presente nelle iniziative EU di sviluppo tecnologico ma è un'alternativa possibile per le iniziative di aggior-

namento tecnologico ad alto TRL (esempio Innovation Fund per la sostenibilità). Gli investimenti sono dedicati alle infrastrutture di distribuzione, stivaggio e logistica vanno da 5-20 M€ per impianti pilota e dimostratori a scala reale.

Trasporto marittimo: soluzioni per la sostenibilità ambientale ed efficienza energetica

Gli sfidanti target sociali, formalizzati negli strumenti normativi internazionali e dell'Unione Europea nel campo marittimo ed in generale, che identificano la sostenibilità del trasporto per le vie d'acqua come obiettivo, fanno emergere la necessità tecnica di conseguire livelli di efficienza energetica e di riduzione dell'impatto climalterante del tutto irraggiungibili con le tecnologie oggi disponibili, ovvero identificano la necessità di un salto tecnologico in diversi ambiti:

- generazione, trasformazione, immagazzinamento dell'energia a bordo;
- ottimizzazione dei consumi energetici;
- gestione dei rifiuti;
- contenimento delle emissioni inquinanti a bordo, in aria e acqua;
- gestione a fine vita dei mezzi.

Allo stato attuale, esistono numerose soluzioni di innovazione incrementale, in particolare per il contenimento dei singoli inquinanti in aria (scrubber, SCR, filtri catalitici, filtri ceramici, etc.), già installati per migliorare le prestazioni su numerosi mezzi, ma mancano soluzioni integrate e più agevolmente applicabili. Con riferimento all'ottimizzazione dei consumi energetici, miglioramenti del bilancio energetico sono continuo oggetto di innovazione in termini di incremento del rendimento energetico globale della nave, di impianti di generazione dell'energia elettrica, analisi e ottimizzazione dei consumi energetici di bordo e recuperi energetici. Innovazioni coinvolgono soluzioni per il recupero energetico e la riduzione dell'impatto ambientale attraverso sistemi di produzione di energia elettrica tramite calore di scarto, nonché l'applicazione di motori dual-fuel in grado di utilizzare combustibili tradizionali e gas naturale liquefatto. In un'ottica

di più lungo periodo, gli studi si stanno concentrando sulle tecnologie per l'introduzione a bordo di combustibili alternativi e vettori energetici come l'idrogeno, per i quali si registrano alcune prime applicazioni in scala ridotta, ma lo sviluppo tecnologico è ancora immaturo su molti fronti e si stima di poter conseguire risultati diffusamente applicabili entro il 2030, assieme ad un quadro normativo di riferimento oggi assente.

Durante l'83ª sessione del Comitato per la Protezione dell'Ambiente Marino (MEPC) dell'IMO, sono state introdotte importanti novità normative in ambito ambientale, con l'obiettivo di accelerare la transizione ecologica del trasporto marittimo. In particolare, è stato approvato un nuovo Capitolo 5 dell'Annex VI della Convenzione MARPOL, che istituisce il **Net-Zero Framework**, un sistema globale finalizzato alla **progressiva riduzione delle emissioni di gas serra (GHG)** delle navi.

Il pacchetto non prevede la creazione di un mercato delle emissioni in stile ETS, ma introduce un sistema di obblighi di monitoraggio, crediti e penalità. Le nuove disposizioni si applicheranno a tutte le unità superiori alle 5.000 tonnellate di stazza lorda, con l'esclusione di alcune categorie specifiche, tra cui le piattaforme offshore e le unità di perforazione.

Come funziona il Net-Zero Framework

A partire dalla sua entrata in vigore, gli armatori e gli operatori saranno tenuti a calcolare e dichiarare annualmente l'intensità delle emissioni di gas serra per unità di energia utilizzata, denominata **Greenhouse Gas Fuel Intensity (GFI).** Il calcolo dovrà includere l'**intero ciclo di vita del combustibile**, considerando anche le fonti energetiche alternative come elettricità da terra, energia eolica o solare.
Sulla base del GFI, l'IMO ha fissato una serie di obiettivi di riduzione annuali sempre più stringenti, con traguardi intermedi a partire dal 2028 e un primo orizzonte fissato al 2035.

Crediti, penalità e fondo per la transizione

Il rispetto degli obiettivi sarà incentivato attraverso un sistema di crediti e penalità:

- Le navi che supereranno gli obiettivi (emissioni inferiori ai limiti) matureranno Surplus Units, trasferibili ad altre unità.
- Le navi che invece non rispetteranno i target dovranno acquistare Remedial Units (RUs), con un prezzo iniziale compreso tra 100 e 380 dollari/tonnellata di CO_2 equivalente, a seconda della gravità della violazione.

I ricavi ottenuti dalla vendita delle RUs saranno convogliati in un nuovo fondo internazionale: l'IMO Net-Zero Fund, che finanzierà progetti a sostegno della transizione energetica del settore.

Nuova ECA nell'Atlantico nord-orientale

Oltre al Net-Zero Framework, la sessione ha sancito un'altra importante decisione ambientale: la creazione di una nuova Area di Controllo delle Emissioni (ECA) nell'Atlantico nord-orientale. Le nuove regole riguarderanno le emissioni di ossidi di zolfo (SOx), particolato (PM) e ossidi di azoto (NOx), e coinvolgeranno le Zone Economiche Esclusive e i mari territoriali di Regno Unito, Irlanda, Francia, Spagna, Portogallo, Groenlandia, Islanda e Isole Faroe.

I limiti imposti prevedono:

- un contenuto massimo di zolfo allo 0,10%, con entrata in vigore 12 mesi dopo l'adozione;
- nuovi standard sulle emissioni di NOx per le navi contrattate a partire dal 2027.

Trasporto ferroviario: sistemi energetici innovativi e gestione del ciclo di vita

Per inseguire la sfida tecnologica di un sistema ferroviario completamente decarbonizzato è necessario sviluppare tecnologie in grado di fornire valide alternative al diesel (celle a combustibile/idrogeno, soluzioni full electric/batterie, sistemi ibridi per linee parzialmente elettrificate), lo sviluppo di tecnologie di stoccaggio

dell'energia a bordo e lungo linea, considerando soluzioni capaci di recuperare energia di frenata e bilanciare il flusso di energia lungo la linea.

Per rispondere alla sfida tecnologica di un sistema ferroviario completamente decarbonizzato e della gestione intelligente del ciclo di vita si possono elencare abilitatori tecnologici, come:

- Sistemi di propulsione efficienti e alternativi. Lo sviluppo di tecnologie potenzialmente in grado di fornire valide alternative al diesel (ad esempio celle a combustibile/H_2 o soluzioni full electric/batterie) dev'essere ulteriormente maturato per tenere conto delle specificità delle ferrovie. Ad esempio, nel caso di linee ferroviarie solo parzialmente elettrificate, dovrebbe essere studiato anche il funzionamento ibrido dei treni;
- Sistemi innovativi di accumulo dell'energia di bordo (ESS) e delle tecnologie di ricarica, riducendo il consumo medio di energia e fornendo anche un'alternativa alla propulsione diesel;
- Infrastrutture energetiche intelligenti. Tecnologie di stoccaggio dell'energia a bordo e lungo linea, considerando soluzioni capaci di recuperare energia di frenata e bilanciare il flusso di energia lungo la linea e smart grid;
- Soluzioni di riciclo/riuso/smantellamento dei componenti del sistema ferroviario capaci di ricomprendere e trasferire il riciclo in ambito manifatturiero e non (come batterie di nuova generazione, componenti strutturali in materiali compositi, etc.);
- Nuove tecnologie da applicare ai sottosistemi ferroviari per sviluppare veicoli più leggeri e più efficienti dal punto di vista energetico, come innovazione nell'elettronica di potenza per la trazione, nuovi materiali compositi per le parti strutturali e no, riduzione del rumore, realizzazione di freni innovativi, carrelli più leggeri, isolamento delle porte, nuove soluzioni di ventilazione e condizionamento dell'aria (HVAC) resistenti anche ad eventi pandemici.

La disponibilità di queste soluzioni ben integrate sui futuri treni è a lungo periodo, ben oltre i 5 anni. L'impatto impatto industriale è elevatissimo in quanto richiedo-

no un profondo cambiamento della concezione del mezzo ferroviario e del suo uso ma anche della catena del valore in quanto le tecnologie da integrare sono sostanzialmente diverse da quelle attuali. L'impatto socioeconomico è altrettanto elevato sia per le ripercussioni sulla mobilità, sulle infrastrutture e per la necessità di emettere nuove normative necessarie a fare funzionare in modo sicuro ed ordinato questi nuovi treni. Tutto questo è oggi incluso nelle iniziative di ricerca EU e nazionali anche se non ancora in quelle normative e di standardizzazione. Gli investimenti per arrivare ad un TRL 7 sono nell'ordine dei 100 M€ o oltre per la singola tecnologia e per il sistema di gestione del ciclo di vita.

N. 2 NUOVE INFRASTRUTTURE AEROPORTUALI / PORTUALI

Mobilità aerea: infrastrutture aeroportuali e stazioni di carica

L'avvento della nuova mobilità aerea richiede l'implementazione di infrastrutture aeroportuali innovative, come eliporti urbani e stazioni di ricarica elettrica, in particolare per gli aerotaxi e i droni elettrici nel caso di velivoli di piccole dimensioni mentre, nel caso di velivoli di dimensioni maggiori, gli esistenti aeroporti dovranno essere aggiornati per permettere la loro operatività e rifornimento includendo numerose nuove funzioni:

- **Infrastrutture per la gestione dell'idrogeno.** La mobilità aerea basata sull'idrogeno necessita di infrastrutture dedicate molto delicate e con impatto rilevante per dimensioni e superfici occupate, di processi specifici, dello stoccaggio e per le operazioni di rifornimento dei velivoli.
- **Infrastrutture per la ricarica o sostituzione delle batterie**. Anche in questo caso bisognerà sviluppare stazioni dedicate, processi operativi specifici e che implicheranno anche diverse procedure di carico e scarico merci ed imbarco e sbarco passeggeri
- **Infrastrutture di sicurezza**. La Safety e la Security sono di primaria importanza nella mobilità aerea. Sono necessari sistemi avanzati di gestione per monitorare e gestire i rischi associati alle operazioni di terra ed in volo connesse all'utilizzo delle tecnologie innovative qui elencate.
- **La normativa e la regolamentazione.** Poiché la mobilità aerea con basse emissioni di qualunque dimensione siano i velivoli è una soluzione emergente, le normative e le regolamentazioni stesse sono in fase di sviluppo. Le autorità di regolamentazione e tutti gli stakeholder a livello globale, essendo l'aeronautica un sistema globale, lavorano per garantire che le operazioni restino sicure e sostenibili ambientalmente ed economicamente.

La sostenibilità finanziaria delle infrastrutture aeroportuali sarà sostenuta dalla crescente opportunità commerciale rivolta ad un mercato più ampio. Saranno sviluppati nuovi modelli commerciali. Al momento non è possibile quantificare le risorse economiche necessarie. La scalabilità, necessaria per compensare gli

elevati costi di veicoli, infrastrutture, nuovi processi rappresenta una sfida importante che in questo momento è in discussione nell'ambito di AZEA[2] che appunto dibatte le conseguenze della nuova mobilità aerea sul sistema infrastrutturale europeo.

Trasporto marittimo: infrastruttura di comunicazione e connettività a bordo e nave-terra

Le tecnologie digitali di comunicazione sono un asset sempre più essenziale in tutti i settori della mobilità e in particolare in quella marittima in relazione alla ampiezza geografica delle rotte. La transizione è progressivamente verso le tecnologie 5.0 di connettività e comunicazione per proporre soluzioni di supporto alla navigazione, gestione della catena logistica, sicurezza dei dati.

Trasporto marittimo: Logistica del sistema portuale

L'Italia è da sempre stata definita come la piattaforma logistica del Mediterraneo. Il sistema portuale italiano, con i suoi circa 8.8 milioni di TEU movimentati e 48 milioni di passeggeri registrati nel corso del 2022 (dati Assoporti gen-sett. 2022) rappresenta un elemento strategico, che deve assicurare adeguati standard di efficacia, sicurezza e sostenibilità.

Nel contesto di una crescente digitalizzazione dei processi produttivi e logistici, anche il settore portuale sta vivendo una profonda trasformazione. I cosiddetti **smart port**, o porti intelligenti, rappresentano una nuova generazione di infrastrutture marittime che integrano tecnologie avanzate – come l'Internet of Things (IoT), l'intelligenza artificiale (AI), i big data e il 5G – per **ottimizzare le operazioni, ridurre l'impatto ambientale e migliorare la competitività** a livello globale.

Questa evoluzione nasce dall'esigenza di affrontare sfide sempre più complesse, come l'aumento dei volumi di traffico merci, la necessità di sostenibilità ambientale e la richiesta di trasporti più veloci ed efficienti. Gli smart port diventano così

[2] *AZEAche significa Alliance for Zero Emission Aircraft, è un'iniziativa EC che coinvolge la catena del valore aeronautica per definire le attività di ricerca, sviluppo ed infrastrutture necessarie a realizzare il trasporto aereo a zero emissioni*

nodi strategici all'interno delle **catene di approvvigionamento globali**, capaci di offrire nuove opportunità di sviluppo economico e innovazione.

Porti Smart: Vantaggi e Priorità Strategiche per l'Italia

I porti smart rappresentano un'opportunità cruciale per modernizzare il settore logistico-portuale italiano, migliorandone la competitività a livello globale attraverso innovazione tecnologica, sostenibilità e integrazione territoriale.

Vantaggi principali:

- **Efficienza operativa:** La digitalizzazione dei processi doganali e logistici consente una maggiore velocità nello sdoganamento, migliore tracciabilità delle merci e riduzione dei costi.
- **Sostenibilità ambientale:** L'adozione di tecnologie verdi, come il cold ironing e l'uso di combustibili alternativi, permette di ridurre le emissioni e migliorare l'efficienza energetica.
- **Sicurezza e resilienza**: L'integrazione di sistemi intelligenti rafforza la gestione delle emergenze e la sicurezza delle infrastrutture portuali.

Aree strategiche per lo sviluppo nazionale:

- **Digitalizzazione e semplificazione:** Utilizzo efficace delle tecnologie digitali per snellire le procedure amministrative e doganali.
- **Competenze professionali:** Formazione e disponibilità di personale qualificato nel settore della logistica portuale.
- **Decarbonizzazione e infrastrutture:** Interventi mirati per ridurre l'impatto ambientale e superare le incertezze su risorse e costi legati alla transizione ecologica.
- **Intermodalità sostenibile:** Promozione del cabotaggio marittimo integrato con il trasporto su gomma, come alternativa efficiente al trasporto esclusivamente stradale.

Integrazione porto-città: Attenzione agli aspetti sociali e urbanistici, particolarmente rilevanti nel contesto italiano, dove porti e centri urbani coesistono in spazi ristretti.

N. 3 NUOVE CONFIGURAZIONI DI MEZZI DI TRASPORTO

Mobilità aerea: configurazioni di velivolo

Le configurazioni velivolo avanzate dovranno essere capaci di integrare le soluzioni per una mobilità a zero o basso impatto, vedere la discussione sul tema nello scenario n.1, sia incorporare ulteriori soluzioni innovative capaci di offrire al trasporto aereo nuove funzioni oppure una drastica riduzione della resistenza all'avanzamento e quindi dei consumi aggiuntiva rispetto ai contributi forniti da una propulsione più efficiente o da energie a zero o basso impatto ambientale. Due sono gli ambiti tecnologici di studio più attuali:

- **Velivoli a decollo e atterraggio verticale** (VTOL). La capacità di decollo e atterraggio verticali è essenziale per molte applicazioni di air mobility, tra cui gli aerotaxi e i droni in ambito urbano, oppure nei convertiplani di maggiore dimensione (per esempio in Italia lo AW609 in sviluppo da Leonardo) per la mobilità a scala regionale. Queste soluzioni che implicano, oltre al cambiamento radicale della configurazione del velivolo anche una serie di tecnologie di controllo, sicurezza molto innovative, consente ai velivoli di decollare e atterrare in spazi ristretti, come eliporti urbani o stazioni di ricarica designate.

- **Velivoli con geometrie innovative e adattabili.** L'abbattimento delle emissioni di inquinanti passa attraverso la riduzione della resistenza aerodinamica e del peso del velivolo entrambe governate dalla geometria: la possibilità di modificare la geometria delle superfici aerodinamiche durante il volo consente di rispondere al meglio alle specifiche esigenze della missione. Configurazione innovative come velivoli tuttala (Blended Wing Body) o velivoli a geometria variabile grazie a strutture adattative sono una delle vie della ricerca verso un efficientamento dei velivoli commerciali. L'esigenza di atterrare e decollare verticalmente per ridurre gli spazi degli aeroporti ma al contempo di avere velocità di crociera maggiori degli attuali elicotteri, richiedono delle configurazioni ibride come i convertiplani (di nuovo l'esempio dello AW609) o velivoli derivati dall'elicottero ma dotati anche di superfici alari ed eliche spingenti (Airbus Racer).

Mobilità aerea: struttura e sistemi dei velivoli

La forma e l'architettura dell'aereo hanno raggiunto livelli di assoluta eccellenza al di là delle possibili innovazioni radicali prima descritte. Nell'ambito delle attuali configurazioni velivolo o come contributo complementare ed aggiuntivo ai benefici delle nuove configurazioni velivolo, ulteriori miglioramenti delle prestazioni possono derivare da:

- materiali innovativi adattativi che possano permettere ulteriori guadagni in termini di efficienza rendendo possibili superfici con forme variabili a seconda delle esigenze (compliant)
- materiali leggeri e resistenti che rendono i velivoli più efficienti dal punto di vista energetico e consentono una maggiore autonomia di volo a parità di energia.
- Sistemi sensoriali integrati e distribuiti che acquisiscono le informazioni dello stato di sistemi e sottosistemi del velivolo che contribuiscono a garantire sia livelli di sicurezza adeguati agli standard aeronautici e contestualmente permettono di estendere la vita operativa del velivolo attraverso apposite operazioni di manutenzione predittiva.

Trasporto marittimo: strutture e architettura dei natanti

Ripensare e migliorare le prestazioni delle navi, in modo tale da permettere ulteriori guadagni in termini di efficienza energetica e limitazione delle emissioni, riguarda svariati aspetti, tra cui:

- **La propulsione assistita.** Le navi a propulsione eolica (Figura 6), impiegano l'energia del vento nelle nevi attraverso tecnologie e dispositivi integrati da giganteschi aquiloni ai sistemi alari. I rotori Flettner constano di grandi cilindri che ruotano lungo l'asse verticale quando l'aria li attraversa, per l'effetto Magnus. In altre parole, il vento soffia, i cilindri



Figura 6: Nave a propulsione assistita (progetto EU WISPER)

generano portanza e la nave viene spinta in avanti. Tale sistema di propulsione integra, quindi, i sistemi attualmente in uso, riducendo il consumo di carburante di origine fossile e limitando le emissioni generate. Soluzioni simili e modulari sono allo studio per permettere il retrofit.

• **L'Air lubricating system.** Un sistema che riduce l'attrito tra lo scafo di una nave e l'acqua, creando uno strato di bolle d'aria sotto la carena per migliorare l'efficienza energetica e ridurre il consumo di carburante. Tale tecnologia, oltre a ridurre significativamente il consumo di carburante, impedisce anche l'adesione di incrostazione (biofouling) e mitiga le emissioni acustiche della nave.

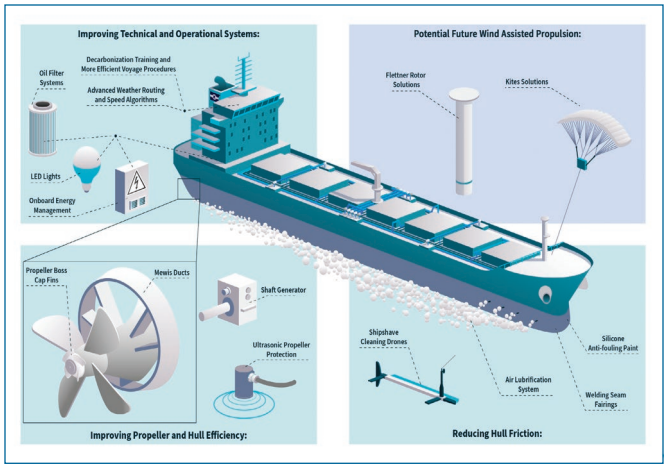


Figura 7: Tecnologie per l'efficienza energetica delle navi

• **Integrazione**, ovvero tenere conto dell'impatto che ogni soluzione ha sugli altri sottosistemi, di una serie di elementi e tecnologie innovative su una nave del futuro quali: sistemi di lubrificazione ad aria, gestione intelligente dell'energia, ottimizzazione idrodinamica; uso di fonti energetiche rinnovabili o a zero e basse emissioni. Infatti, nessuna singola soluzione può raggiungere la riduzione di emissioni prevista dalla EU.

• **Adeguati strumenti** di supporto alle decisioni, analisi di scenari "what-if", destinati a cantieri navali, produttori di apparecchiature, autorità e operatori portuali,

commissioni fluviali, società di classificazione, aziende energetiche e aziende digestione delle infrastrutture di trasporto per permettere scelte bilanciate ed oculate con ritorni positivi in termini economici e sociali lungo l'intero ciclo di vita.

Trasporto marittimo: Nuovi mezzi marini per la Blue Economy

Lo sviluppo dell'economia del mare attraverso l'uso più ampio delle risorse biotiche e abiotiche del mare e dei fondali marini sta attivando una crescente richiesta di mezzi marittimi di superficie e subacquei chiamati ad operare in condizioni sempre più complesse sia ambientali sia funzionali. Per rendere disponibili questi mezzi, è necessario migliorare l'indagine e la ricerca tecnologica per realizzare tecnologie e sistemi atti ai diversi scopi funzionali peculiari dei diversi settori, che esemplificando sono categorizzabili in:

- mezzi per lo sfruttamento delle risorse biotiche marine (acquacultura in mare aperto, ecc.);
- mezzi per lo sfruttamento di risorse abiotiche marine (energie rinnovabili marine, risorse minerarie di fondo mare, ecc.)
- mezzi di supporto per attività off-shore anche in contesti estremi (navi da ricerca, officina, di servizio ad installazioni offshore, di ispezione e monitoraggio, ecc.

Allo stato attuale, lo sviluppo di mezzi per lo sfruttamento delle risorse offerte dall'ambiente marino o lo svolgimento di operazioni complesse (impianti wind-offshore, deep-sea mining, ecc.), anche in contesti estremi (regioni artiche o con difficili condizioni metereologiche), è prioritario per lo sviluppo di questi settori economici ad alto valore aggiunto ed in quanto apre la strada allo sviluppo di ulteriori settori di trasferimento in mare di business. La peculiare elevata intensità tecnologica di questi mezzi li rende un ambito primario di applicazione delle innovazioni e quasi un banco di prova di tecnologie prima della loro diffusione su mezzi commerciali più tradizionali; in questa linea, questi mezzi speciali hanno livelli massimi di automazione e applicano nuovi paradigmi di progettazione e configurazione, in particolare quelli destinati ad operazioni subacquee anche a grandi profondità. (Fig. 8)



Figura 8: PROTEUS (Portable RObotic TEchnology for Unmanned Surveys) con sensori atmosferici nella campagna 2018 condotta dal CNR-INM alle isole Svalbard. (E.J. Adler e J.R.R.A. Martins, 2023)

La cantieristica italiana, e in termini più generici quella occidentale, da diversi anni risponde alle esigenze emergenti tramite un processo di specializzazione che ha portato alla costruzione di mezzi ad alto valore aggiunto, caratterizzati da elevati contenuti tecnologici. Ulteriori sviluppi e tecnologie dipenderanno fortemente dallo sviluppo della domanda di tali mezzi "speciali".

Trasporto stradale: Light vehicle

La novità più eclatante è rappresentata certamente dal servizio di monopattini in sharing, che offre un'opzione di trasporto "dell'ultimo miglio" rispettosa dell'ambiente, inclusiva e affidabile. Si tratta di un servizio di trasporto innovativo che, negli ultimi 3 anni, ha visto crescere esponenzialmente il tasso di utilizzo, a livello globale, europeo e nazionale.

Gli operatori di monopattini e biciclette in sharing operano in tutto il mondo: solo BIRD, ad esempio, gestisce programmi di micro-mobilità in oltre 350 città in tutto il mondo, di cui 200 in Europa e 21 in Italia, con una flotta globale di oltre 221.000 veicoli utilizzati da più di 24 milioni di persone per effettuare oltre 167 milioni di viaggi in 4 continenti. Dal 2017 al 2022 i veicoli di BIRD hanno permesso

agli utenti di risparmiare 102 milioni di km non percorsi in auto, e di conseguenza oltre 18 mila tonnellate di CO_2. Circa il 33% di queste corse ha sostituito i viaggi in auto e/o è servito come collegamento dell'"ultimo miglio", quale adduzione al trasporto pubblico. Anche in Italia la micro-mobilità ha registrato un sensibile incremento nel corso del 2022: le percorrenze (di tutti gli operatori in Italia) sono passate da 30,5 milioni di km (2021) a 48,4 milioni (2022); i noleggi sono passati da 12,5 milioni (2021) a 18,1 milioni (2022). Il recente dibattito sulla micro-mobilità in sharing (amplificato dalla scelta della città di Parigi di non procedere a un rinnovo dell'accordo con gli attuali operatori) ha avuto il pregio di portare alla luce alcuni temi che sono dirimenti per questo settore.

- La necessità di un ripensamento delle infrastrutture per la mobilità urbana. Il tessuto stradale delle città, fino ad oggi strutturalmente concepito come spazio destinato ai soli autoveicoli, deve affrontare una grande trasformazione, volta a incrementare le corsie ciclabili e a ridurre gli spazi destinati alle auto, accompagnando queste scelte di policy con disincentivi all'utilizzo del mezzo privato.
- La necessità di stabilizzazione del mercato, per fare in modo che gli operatori più affidabili ed economicamente solidi possano operare in un contesto normativo certo, utile a supportare le scelte di investimento nella mobilità cittadina, trasformandoli in partner delle amministrazioni al pari degli attuali player del TPL, di linea e non di linea.
- La piena concorrenza tra settore sharing (che può garantire il controllo da remoto delle proprie flotte) e settore privato deve essere assicurata mediante la parificazione della disciplina applicabile alle due diverse tipologie di veicolo.
- Le Amministrazioni dovrebbero incrementare gli sforzi che stanno già compiendo per un'effettiva integrazione delle offerte di spostamento cittadino, non soltanto mediante l'adozione delle cc.dd. tecnologie MaaS, ma attraverso una combinazione di scelte urbanistiche e logistiche utili, in ultima istanza, agli utenti.
- Le Istituzioni, nazionali e locali, devono aggiornare il processo formativo delle prossime generazioni, includendo la micro-mobilità e la mobilità leggera tra le materie di studio per il titolo abilitativo della patente, e dedicando specifiche attività di formazione e sensibilizzazione nell'ambito degli istituti scolastici.

Trasporto marittimo: Navi autonome

La rivoluzione digitale in ambito navale sta permettendo un globale incremento di efficienza, sia in termini di capacità di rispondere alla domanda di maggiori servizi per i passeggeri e per il sistema logistico delle merci, con importanti ricadute dirette e indirette sulla sostenibilità ambientale; sia renderà possibile lo sviluppo di sistemi estensivi di rilevamento e di monitoraggio (sensorizzazione) per la gestione ottimizzata degli impianti di bordo, di strumenti situation awareness basati su modellazione e gestione (digital twin) e da sistemi di supporto alla navigazione (dynamic positioning/station-keeping, automatic docking, ecc.), che consentiranno un significativo miglioramento dell'operatività in sicurezza in qualsiasi condizione di esercizio fino ad arrivare ad una nave "autonoma".

"*Una nave che, in varia misura, può operare indipendentemente dall'interazione umana*" è la definizione adottata nell'ambito del lavoro dell'IMO sulle **MASS** (Maritime Autonomous Surface Ships), ossia navi di **superficie marittime autonome.**

L'IMO ha identificato **quattro livelli di autonomia**, che sono:

- **Livello 1** – Supporto decisionale automatizzato:
  La nave è controllata dall'equipaggio a bordo, ma ha sistemi automatizzati e di supporto alle decisioni.
- **Livello 2** – Controllata da remoto con equipaggio a bordo:
  La nave è controllata da remoto, ma l'equipaggio è ancora presente a bordo per intervenire se necessario.
- **Livello 3** – Controllata da remoto senza equipaggio a bordo:
  La nave è completamente controllata da remoto, senza personale a bordo.
- **Livello 4** – Completamente autonoma:
  La nave è capace di prendere decisioni e agire in modo indipendente, senza alcun intervento umano.

Tutto ciò richiede lo sviluppo dei sistemi di connettività interni al mezzo e di comunicazione con le infrastrutture a terra e le altre navi (ship-to-shore, ship-

to-ship), che tuttavia rendono necessario un costante sforzo sul fronte della cyber-security, la cui importanza è strategica per il settore. La concentrazione dell'innovazione sulla sicurezza fisica del mezzo, delle persone e del carico è, in parallelo, volta a sviluppare sistemi predittivi per prevenire avarie e incidenti, e assicurare la capacità di ritorno ad un porto sicuro. L'attività di innovazione è sfidante data la complessità del sistema nave che mette a dura prova il conseguimento di una sensorizzazione diffusa e di realizzazione di una modellazione statica e dinamica della nave e dei suoi impianti, capace di accompagnarla lungo tutta la vita operativa, che rimangono gli obiettivi necessari per la sua completa automazione.

UN ESEMPIO DI NAVE A GUIDA AUTONOMA

In Norvegia è stata realizzata nei cantieri Vard (Fincantieri), la Yara Birkeland (Fig. 9), la prima nave portacontainer a guida autonoma e propulsione ad ammoniaca verde / energia elettrica verde. La nave è dotata di sensori e sistemi di monitoraggio e controllo integrati necessari per le operazioni remote e autonome, oltre ai sistemi di azionamento elettrico, batteria e controllo della propulsione. Sarà gestita dal centro operativo e di monitoraggio di Massterlys (joint venture tra Kongsberg e Wilhelmsen) a Horten e viaggerà tra i porti di Herøya, Brevik e Larvik nel sud della Norvegia in un tratto di mare gestito dal sistema VTS[3] delle amministrazioni costiere norvegesi a Brevik.



Figura 9: Yara Birkeland (Yara, 2023; Shipping Italy, 2023)

[3] Il VTS (Vessel Traffic Service) è un sistema mirato ad incrementare il livello di sicurezza della navigazione marittima, aumentare l'efficienza dei porti evitando conseguenze negative alla mobilità all'interno degli stessi, riducendo contestualmente il rischio di incidenti marittimi ed i conseguenti pericoli per la vita umana in mare e per l'ambiente marino a causa del possibile rilascio di sostanze inquinanti.

N. 4 DIGITALIZZAZIONE DEL SISTEMA TRASPORTI

Mobilità aerea: avionica

L'avionica di bordo svolge numerosi compiti essenziali per la funzionalità e la sicurezza del velivolo. Essa si differenzia dalle, soluzioni per il trasporto di superficie -stradale, marittimo e ferroviario-, equivalenti per funzione e scopo, essenzialmente per gli stringenti criteri di sicurezza applicabili per la loro qualifica e certificazione che rendono le soluzioni digitali molto più complesse, onerose e con tempi di introduzione in servizio molto più lunghi di quelle sugli altri mezzi di trasporto. Per esempio, stante le vigenti norme di certificazione in campo aeronautico, risulta molto difficile o di fatto impossibile ricorrere a sistemi basati su IA per la gestione di sistemi che possono avere effetti o conseguenze sulla sicurezza del volo come controllo del traffico, manovra del velivolo, controllo della propulsione o più in generale dell'energia di bordo. Ovvero, sempre per rispettare i regolamenti di certificazione, ogni sistema di comunicazione dovrà essere messo al sicuro da accessi indesiderati ma al contempo anche, nonostante la complessità aggiuntiva di tali sistemi, rispettare i criteri di sicurezza ed affidabilità molto spinti. Con questi vincoli, si possono citare le seguenti funzioni dell'avionica:

- **Guida autonoma.** I sistemi per la guida autonoma rappresentano un "enabler" per la mobilità sostenibile consentendo il rispetto di requisiti di safety ed ambientali. Questi sistemi possono variare dalla semplice assistenza al pilota (a bordo o da remoto) all'automazione completa del volo sempre che soddisfino gli sfidanti requisiti di sicurezza del settore aeronautico.
- **Controllo e monitoraggio dei sistemi di bordo**, da quelli per la navigazione anche satellitare ai sistemi di comunicazione di bordo, rappresenta l'uso essenziale delle suite di avionica contribuendo a migliorare la sicurezza delle operazioni e la navigazione. L'avionica con le applicazioni per le rilevazioni di guasti e stato dei componenti possono essere impiegate per la gestione della flotta e della manutenzione interagendo con i sistemi di bordo.
- **Connettività.** La mobilità aerea dipende da una connettività avanzata per consentire la comunicazione tra velivoli, operatori e sistemi di gestione del traffico aereo. Le reti di comunicazione ad alta velocità e sicure sono essenziali per consentire la comunicazione tra i velivoli e i sistemi di controllo del traffico e dei

passeggeri per migliorare comfort ed esperienza di volo Questi sistemi potranno anche consentire servizi di trasporto aereo su richiesta e velivoli autonomi.

- **Gestione del traffico.** Per garantire una mobilità aerea sicura ed efficiente, è necessario sviluppare sistemi di gestione del traffico aereo avanzati che possano integrare il traffico dei droni e degli aerotaxi con il traffico aereo tradizionale e dei nuovi velivoli a basse emissioni che potrebbero avere prestazioni diverse da quelli tradizionali in termini di quota, velocità operativa e ratei di salita e discesa.

Trasporto marittimo: digitalizzazione e automazione

Le motivazioni che spingono all'automazione della nave e della sua conduzione sono strettamente collegate al tema del recupero di efficienza sia ambientale ed energetica sia operativa. Il raggiungimento di questo obiettivo procede attraverso passi intermedi di automazione interna, progressiva gestione delle infrastrutture e degli impianti da remoto, progressiva conduzione da remoto fino alla completa automazione. Le innovazioni fondamentali per procedere in questo senso richiedono:

- l'aumento della pervasività del sistema di automazione;
- l'integrare sul mezzo di trasporto con relative di infrastrutture di supporto fisse nuovi sottosistemi/ funzioni e facendo evolvere i sistemi di supporto alle decisioni, anche integrando tecnologie di machine learning e AI;
- Il miglioramento dell'intelligenza complessiva nel sistema, sia nel controllo degli impianti di bordo che nel controllo dei sistemi di navigazione e manovra;
- Il miglioramento del design complessivo, l'operatività, la manutenzione predittiva e l'integrazione (digital twin) per il monitoraggio/service da terra e l'analisi delle performance (big data).

Una tale evoluzione rende inoltre indispensabili ricerche approfondite in materia cyber-security per evitare interferenze malevoli nella gestione di reti complesse come quelle del traffico navale in aree ristrette. Tra le numerose applicazioni possibili la principale riguarda l'automazione della nave. Il tema della navigazione autonoma si sta delineando sempre più come una delle tendenze tecnologiche

più importanti per la mobilità marittima commerciale, anche in ragione anche delle considerevoli sfide di ricerca che caratterizzano tale argomento. Le priorità di medio-lungo periodo in tale ambito si concentrano su integrazione dei sistemi di bordo e automazione e conduzione unmanned.

L'applicazione della digitalizzazione nel trasporto marittimo richiede l'introduzione di innovazioni radicali sia tecnologiche sia di sistema con conseguente significative sulla configurazione del mezzo di trasporto e sulla sua operatività. Inoltre, hanno un impatto industriale molto alto influendo su praticamente ogni protagonista della catena del valore che deve mettere a disposizione capacità e competenze diverse. Tutte queste tecnologie sono già ben comprese nelle agende tecnologiche europee e nazionali e richiedono una revisione spesso molto profonda della normativa applicabile per la sicurezza e l'operatività dei mezzi di trasporto nonché la preparazione di standard tecnici che permettano la corretta integrazione a livello globale o transnazionale.

Trasporto ferroviario: digitalizzazione e automazione

L'implementazione di sistemi avanzati di controllo interoperabile dei treni è guidata dallo sviluppo di abilitatori tecnologici, come:

- **Connettività veloce, sicura, affidabile e ad alta capacità**, raggiungibile attraverso il trasferimento in campo ferroviario delle più recenti innovazioni nell'ambito delle telecomunicazioni;
- **Comunicazione veicolo-veicolo** (V2V) capace di ridurre i costi operativi sulle linee a basso traffico, di progredire verso un sistema di controllo meno centralizzato, e quindi di facilitare l'autonomia controllo-comando del treno;
- **Localizzazione affidabile e precisa dei treni** e nuovi sistemi di distanziamento, sia per passeggeri che per le merci. Possibile attraverso lo sviluppo di sistemi all'avanguardia basati su Global Navigation Satellite (GNSS), in particolare Galileo, e supportati da tecnologie sensoristiche innovative, è da accoppiare all'implementazione a bordo treno della tecnologia ERTMS (European Rail Traffic Management System), con diretto impatto sull'incremento della capacità del sistema e sostenibilità della guida;

• **Intelligenza artificiale e data mining** a supporto del funzionamento e dell'integrazione dei vari sistemi tecnologici necessari ai servizi di mobilità, così da ottimizzare la gestione delle risorse. Ciò porterà a migliori capacità predittive, soluzioni on demand e collegamenti intermodali più fluidi;

• **Migrazione dei componenti** di terra dedicati alle operazioni di controllo-comando al cloud;

• **Monitoraggio, manutenzione e incremento della sicurezza di infrastrutture e veicoli** attraverso sensori e IA a lungo raggio. Ciò permetterà di incrementare la sicurezza del sistema ferroviario, oltre che le sue efficienza, resilienza e affidabilità. Ciò potrà essere raggiunto attraverso l'implementazione in larga scala di soluzioni di manutenzione predittiva, a sua volta ottenuta dalla fusione tra Information Technology (IT) e Operational Technology (OT);

• **Sistema avanzato di controllo e monitoraggio del treno**, implementando sui sistemi di controllo di trazione, freni e porte soluzioni tipiche dell'automazione, capaci di consentire livelli di sicurezza elevati;

• **Accoppiamento automatico digitale (DAC – European DAC delivery Programme)**, che si inserisce nel sempre più diffuso concetto di treno merci intelligente, favorendo non solo un efficientamento del sistema con lo sviluppo di servizi digitali integrati competitivi, ma anche un incremento della sicurezza e dell'affidabilità del processo, aumentando le capacità dell'intero sistema merci;

• **ERTMS on board** con diretto impatto sull'incremento della capacità del sistema e sostenibilità della guida

Contestualmente, lo sviluppo dell'automazione della catena logistica permette di accedere a soluzioni che attraverso il trasferimento tecnologico hanno il potenziale di rafforzare il collegamento diretto del sistema di trasporto merci su rotaia con il processo di produzione e ad altri modi di trasporto. Le attività di automazione dei treni merci negli scali di smistamento e terminal intermodali hanno quindi l'opportunità di incrementare la propria maturità. Sfruttando l'evoluzione dell'IoT, vi è la grande potenzialità di aumentare sicurezza ed efficienza complessive.

Trasporto marittimo: Transizione del processo produttivo

La possibilità di disporre di siti di produzione sicuri, efficienti ed ecosostenibili rappresenta un elemento di grande importanza al fine di incentivare la competitività del settore su scala globale.

Le priorità di medio-lungo periodo in tale ambito si concentrano su:

- la transizione digitale 5.0;
- soluzioni progettuali e produttive integrate;
- sicurezza.

La rapida evoluzione tecnologica, impiantistica e dei materiali dei mezzi navali richiede un adeguamento dei processi e delle tecnologie progettuali e costruttive per poter garantire i più alti livelli di qualità e sicurezza al prodotto, dando vita a processi che riducano i costi, economici e ambientali, a vita intera. La ricerca in materia ha concentrato la propria attenzione in riferimento all'automazione, a nuovi modelli computazionali, alla robotica industriale, unitamente al supporto di metodologie di progettazione basate sulla realtà virtuale (studio d'immagini, modellazione 3D da rilevato full-scale, realtà aumentata) e l'analisi dei dati. Una simile evoluzione procede in tal senso verso un approccio olistico e circolare, mirato a promuovere soluzioni innovative (nuovi materiali, integrazione di materiali eterogenei, nuove soluzioni di pitturazione, giunzione, 3D printing, ecc.) per assicurare l'integrazione tra progettazione e produzione, e considerare l'intero ciclo di esistenza della nave, dal design fino alla dismissione, con maggiore attenzione inoltre ai servizi post-vendita di supporto. Grande interesse concerne inoltre la gestione del fine vita e dello smantellamento della nave nel quadro del processo di disassemblaggio e riciclo.

N. 5 MOBILITÀ URBANA ED INTERURBANA MULTIMODALE E AUTOMATIZZATA

La multimodalità è fondamentale nelle aree urbane e suburbane. La crescente pressione sui sistemi di trasporto passeggeri ha aumentato la domanda di soluzioni nuove e innovative, con vari servizi di trasporto integrati in un servizio accessibile su richiesta, seguendo il concetto di Mobility as a Service (MaaS) che è un paradigma tipico di sistemi di trasporto complessi, quali quelli urbani: rappresenta un cambiamento nel modo in cui le persone accedono e utilizzano i servizi di trasporto. In un sistema MaaS i viaggiatori hanno a disposizione una o più piattaforme integrate che, senza soluzione di continuità, permettono la pianificazione, la prenotazione e il pagamento di varie modalità di trasporto, integrate in un'offerta multimodale, multi-operatore e fortemente personalizzata, caratterizzata dalla coesistenza di servizi di trasporto pubblico, anche offerti da operatori privati, intermediati da soggetti terzi, non necessariamente e direttamente responsabili della produzione dei servizi di trasporto.
In questo scenario è rilevante sviluppare veicoli connessi e autonomi, noti anche con la sigla CAV (Connected and Automated Vehicle). Sono veicoli in grado di muoversi autonomamente (con diversi livelli di autonomia) e di comunicare con gli altri veicoli, con i pedoni o con un'infrastruttura tramite comunicazioni vehicle-to-anything (V2X). I CAV possono offrire mobilità a tutti, restituire tempo prezioso e migliorare la sicurezza stradale.

Nonostante la maturazione tecnologica, il contesto normativo di riferimento in cui operare i sistemi MaaS ed i CAV risulta fortemente frammentato a causa dell'esistenza di una molteplicità di strumenti normativi e programmatici, nazionali, europei ed extraeuropei, atti a disciplinare il settore delle infrastrutture di trasporto e dei mezzi. Inoltre, occorre migliorare l'affidabilità dei sistemi in modo che le informazioni su cui si basa la decisione autonoma siano i) sempre più precise (in termini di accuratezza di posizionamento e di timing) e ii) sempre più sicure (in termini di affidabilità del dato). Parallelamente è importante che cresca l'accettazione globale da parte dei cittadini, sottolineando i benefici di queste tecnologie.

La sfida è integrare (Figura 10) le tecnologie di connettività e automazione che combinate diventano strumenti preziosi per prevenire gli errori umani e situazioni di congestione da traffico, rendendo le strade più sicure sia sui veicoli sia nelle infrastrutture e servizi a supporto.

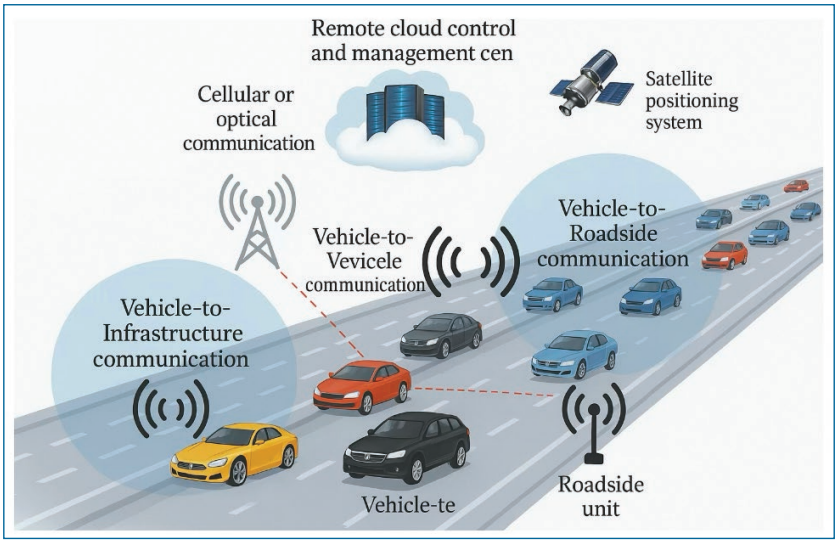


Figura 10: Architetture di comunicazione tra veicoli e tra veicoli e infrastrutture

I CAV ed i sistemi MaaS hanno l'obiettivo di migliorare il sistema di trasporto secondo tre direttrici principali: la sicurezza (intesa come riduzione del numero e della gravità degli incidenti), l'efficienza del traffico (riduzione del tempo di percorrenza a parità di percorso, o aumento se il percorso è più lungo ma soddisfa servizi personalizzati) e l'intrattenimento.

La sicurezza è l'obiettivo più importante. Infatti, circa 1.35 milioni di persone muoiono ogni anno a causa di incidenti stradali e tra i 20 e i 50 milioni sono le persone ferite, con un costo di circa il 3% del prodotto interno lordo; inoltre, gli incidenti

stradali sono la principale causa di morte per i giovani tra i 15 e i 29 anni. Sia i veicoli solamente autonomi che i veicoli connessi possono aumentare notevolmente la sicurezza su strada, ma è l'utilizzo congiunto delle due tecnologie che può portare a eliminare oltre il 95% degli incidenti e raggiungere l'obiettivo della così detta Vision Zero, un progetto di sicurezza stradale nato in Svezia nel 1997 e ora diffuso a livello internazionale, con l'obiettivo di eliminare i morti a causa di incidenti stradali entro il 2050.

Come si può osservare dalla Figura 11, il numero di incidenti negli anni sta diminuendo (curva verde), segno che le misure intraprese funzionano (si pensi, ad esempio, all'ecall, obbligatorio su tutte le nuove auto dal 2018, e allo standard internazionale ISO 39001"Road Traffic Safety Management Systems"). Tuttavia, questa diminuzione ha avuto un rallentamento attorno all'anno 2013, allontanandosi dalla curva desiderata (in blu) che rappresenta l'obiettivo che si è posta l'Unione Europea.

Connettività

Un veicolo connesso è in grado di condividere informazioni e dati con altri sistemi interni che esterni al veicolo, come ad esempio altri veicoli, infrastrutture stradali o con qualsiasi altra rete connessa. In tale contesto il tema della sicurezza informatica diventa di sicuro rilievo.

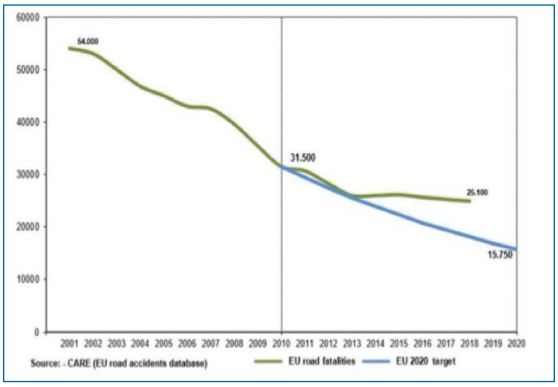


Figura 11: Numero di incidenti stradali in Europa (curva verde) a confronto con gli obiettivi previsti e cioè con il numero di incidenti massimo tollerabile dalla Comunità Europea (curva blu) negli anni dal 2001 al 2020. (Fonte: EC, https://road-safety)

Due sono le tecnologie che si stanno contendendo il mercato: da un lato il Wi-Fi per la mobilità, noto come IEEE 802.11p in USA e ITS-G5 in Europa, dall'altro il Cellular-V2X (C-V2X). Il Wi-Fi per la mobilità nella versione IEEE 802.11p è standard dal 2011 e testato in tutto il mondo anche con migliaia di veicoli. LTE-V2X è stato rilasciato nel 2017 dal 3GPP e rappresenta il primo standard C-V2X, proveniente cioè dal mondo cellulare e che consente la comunicazione diretta tra due oggetti in movimento senza passare attraverso la stazione radio base. Apre, quindi, la strada al 5G-V2X promettendo prestazioni migliori del concorrente in termini di data rate e distanza di copertura. D'altro canto, essendo una tecnologia più nuova, risulta meno testata e con minore disponibilità di dispositivi commerciali. Entrambe le tecnologie lavorano sulla banda dei 5.9 GHz, ma sono già previste bande a frequenze maggiori per le rispettive evoluzioni tecnologiche.

UN PERCORSO PER LA CONNETTIVITÀ

Il Car2Car Communication Consortium[4] ha definito un percorso tecnologico per la messa in campo dei CAV che prevede diverse fasi, note come Day 1, Day 2, etc. Ogni fase prevede determinati requisiti per il sistema di comunicazione, strettamente dipendenti dal livello di autonomia del veicolo stesso. I due mondi tecnologici (quello dell'automazione e quello della comunicazione), infatti, ora non viaggiano più separati, ma con un forte approccio multidisciplinare progettano congiuntamente il veicolo del futuro.

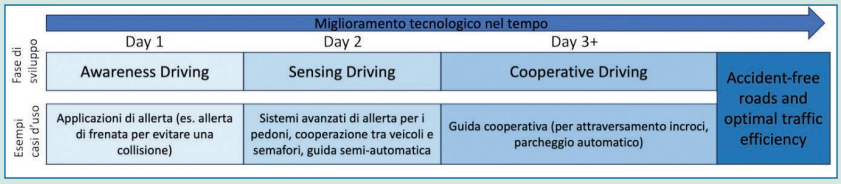


Figura 12: Roadmap dello sviluppo tecnologico e applicativo

• Nel Day 1 si scambiano informazioni relative allo stato attuale tra due veicoli o tra un veicolo (posizione, velocità, accelerazione, direzione) e l'infrastruttura (sia essa un'unità a bordo strada o un centro di controllo remoto) al fine di aumentare la consapevolezza e la conoscenza dello scenario in cui il veicolo (awareness driving) si muove, così che il conducente o il sistema di assistenza a bordo abbiano un maggior lasso di tempo per reagire a situazioni inattese o pericolose (potenziale collisione, condizioni meteo avverso, etc.). Sono casi d'uso che potrebbero già essere in campo se il numero di veicoli equipaggiati con tecnologie per comunicazione V2X fosse elevato.

• Nel Day 2, i veicoli trasmettono non solo informazioni relative allo stato attuale ma anche quelle acquisite dai sensori di bordo come telecamere o radar (sensing driving). Questo consente al veicolo ricevente di estendere la propria visione e diventare consapevole della presenza di "oggetti" che diversamente non avrebbe rilevato, come la presenza di pedoni a bordo strada o veicoli dietro a camion. In questo modo si tutela anche la sicurezza degli utenti vulnerabili della strada, come i pedoni appunto, che non sono equipaggiati con tecnologia di comunicazione veicolare e che quindi non possono avvisare della propria presenza.

• Dal Day 3 comincia una fase nota come guida cooperativa, basata su veicoli di livello almeno 3 che condividono le proprie intenzioni (strade da percorrere, manovre agli incroci) e pianificano in maniera coordinata le azioni da intraprendere.

[4] https://www.car-2-car.org/testseite/testunterseite

Connected and Automated Vehicle (CAV)

L'introduzione di CAV sulle strade può accelerare il raggiungimento degli obiettivi di sicurezza efficienza del traffico ed intrattenimento- In particolare, contribuire ad eliminare tutti gli incidenti dovuti agli errori umani (stanchezza, distrazione, riflessi lenti, guida in stato di ebbrezza o sotto effetto di sostanze stupefacenti, etc.). Oltre all'aumento della sicurezza, i CAV possono contribuire a migliorare l'efficienza del traffico, causando meno rallentamenti, riducendo i tempi di percorrenza e aumentando la capacità delle strade. Questo ha un impatto sulle emissioni di CO_2 che, in base allo scenario, possono diminuire dal 5% al 40%.

C'è un altro aspetto importante da sottolineare: l'inclusività. Un CAV può dare a persone diversamente abili (ipovedenti o persone con scarsa capacità motoria), l'indipendenza che molti di noi danno per scontata, garantendo loro un viaggio sicuro in totale autonomia.

Fino a pochi anni fa, la ricerca scientifica e industriale relativa all'automazione e quella relativa alla connettività del veicolo viaggiavano su strade separate: chi si occupava di sensoristica avanzata e IA si basava solo su informazioni locali o dava per scontato di ricevere ogni altro dato necessario all'occorrenza, e, viceversa, chi si occupava di comunicazioni non considerava di dover trasmettere o ricevere anche i dati acquisiti dai sensori di bordo. Un veicolo autonomo vede attraverso i suoi sensori, cioè in linea di vista, ma non vede attraverso gli ostacoli e non può vedere lontano. Inoltre, i veicoli autonomi, proprio come i conducenti umani, non riescono a coordinare le proprie azioni. Studi recenti hanno dimostrato che un veicolo autonomo non connesso potrebbe addirittura deteriorare le condizioni di traffico, invece che apportare efficienza. Grazie alla connettività reciproca, i veicoli possono "vedere" attraverso gli ostacoli, raggiungere visibilità maggiori di quelle di un sensore o di un occhio umano e, soprattutto, possono coordinare le proprie azioni, scambiandosi informazioni relative allo stato attuale, alle intenzioni e a quanto acquisito dai sensori di bordo.

Il mercato dei veicoli a guida autonoma che, secondo le ultime stime del settore, elaborate da Allied Market Research, vale circa 54,2 B$. In Europa, i veicoli a guida autonoma, secondo P&S Intelligence, genereranno un mercato intorno ai 191,6 B€ entro il 2030, con un tasso di crescita annuo del 18,4%.

[5] *https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/connected-and-automated-vehicles-freeway-scenario-effect-traffic-congestion-and-network-capacity*

L'AUTOMAZIONE SULLE AUTO

La Society of Automotive Engineers (SAE) ha definito 5 livelli di autonomia: fino al livello 2 è il conducente che controlla l'auto, supportato da sistemi di assistenza quali il dissuasore di velocità adattivo (Adaptive Cruise Control, ACC) o l'assistente di mantenimento corsia (lane keeping); ma è dal livello 3 che le cose diventano interessanti, in quanto è il veicolo che assume il controllo sull'accelerazione/frenata e sullo sterzo per un determinato lasso di tempo o in situazioni specifiche, senza che il conducente sia tenuto a una costante sorveglianza del veicolo, anche se dev'essere sempre in condizioni di riprendere completamente il controllo di guida nel momento in cui il sistema lo invita a farlo. Al livello 5, il veicolo è completamente autonomo: non servono volante né pedali, non c'è un conducente ma solo passeggeri. Un veicolo completamente autonomo, quindi, è un veicolo in grado di fare tutto ciò che un conducente umano può fare, grazie a sensoristica di bordo avanzata quali radar, lidar, telecamere e sistemi di posizionamento.

Sia la tecnologia dell'automazione che quella della comunicazione sono sufficientemente avanzate per essere integrate a bordo dei CAV. Sulle nostre strade circolano già veicoli di livello 3 con sistemi di assistenza quali la frenata automatica o il mantenimento della corsia, mentre sono in corso di discussione nuovi regolamenti per autorizzare veicoli autonomi di livello 3. Nonostante la tecnologia sia già disponibile fino al livello 5, tuttavia, occorre aumentare il numero di test in campo, lavorare sull'accettazione della nuova tecnologia e sugli aspetti etici dei sistemi di IA di bordo e sugli aspetti regolamentari (vedi box). Inoltre, va sottolineato che, mentre i sistemi di comunicazione seguono standard internazionali, la sensoristica di bordo è spesso proprietaria e non interoperabile; ancora un po' di strada va fatta nella direzione di sistemi comuni.

LA SITUAZIONE NORMATIVA DEI VEICOLI AUTONOMI

La EC ha adottato regolamenti per autorizzare veicoli autonomi di livello 3 e navette urbane o robotaxi con automazione di livello 4. Le nuove norme allineano la legislazione EU alle regole internazionali delle Nazioni Unite e adottano una nuova legislazione tecnica per i veicoli completamente senza conducente, la prima di questo tipo a livello internazionale. Coprono procedure di test, requisiti di sicurezza informatica, regole per la registrazione dei dati, nonché monitoraggio delle prestazioni di sicurezza e requisiti di segnalazione di incidenti da parte dei produttori di veicoli completamente senza conducente. Questo consente di abilitare funzioni di guida di livello 3, quali il pilota automatico per la guida in colonna dei nuovi modelli Tesla o Audi A8, che non sono (ancora) ammessi nella circolazione stradale.

Per quanto riguarda la connettività, nonostante esistano già da tempo le tecnologie per le comunicazioni V2X, pochi sono ancora i veicoli connessi in quanto non c'è alcuna normativa che ne obblighi l'installazione a bordo. Negli ultimi anni, sia gli Stati Uniti che la EU hanno iniziato ad adottare nuove strategie per rendere obbligatoria la connettività a bordo dei veicoli leggeri. Negli Stati Uniti, la National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) ha emesso a dicembre 2016 una proposta di regolamentazione per rendere obbligatorie le comunicazioni V2X per i nuovi veicoli leggeri a fini di sicurezza identificando nel Wi-Fi per la mobilità la tecnologia di comunicazione principale; tuttavia, da allora, le amministrazioni che si sono succedute non hanno ancora preso una decisione sulla proposta. Nel frattempo, a novembre 2020, la Federal Communication Commission (FCC) ha ridotto di 45 MHz la banda per le comunicazioni veicolari, lasciando soltanto 30MHz per le comunicazioni di sicurezza e suggerendo l'uso della tecnologia C-V2X. In Europa, a marzo 2019, la Commissione Europea ha stabilito i requisiti legali minimi per l'interoperabilità di sistemi di trasporto intelligente e consentire la conseguente distribuzione su larga scala. Si propone un approccio ibrido: tecnologie di comunicazione a breve raggio a 5.9 GHz per servizi critici in termini di tempo utilizzando ITS-G5, già maturo e largamente testato, e tecnologie di

[6] *https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/AUTO/?uri=celex:32023R0988*

comunicazione a lungo raggio per servizi meno critici con la tecnologia cellulare 3G/4G legacy. Nonostante la pressione dei principali attori (come Volkswagen, Renault, NXP, Autotalks e Kapsch TrafficCom) a favore di ITS-G5, esiste una pressione contraria proveniente principalmente dal 5GAA (un'organizzazione globale di industrie dell'automotive e dell'ICT per la mobilità del futuro) che spinge, invece, a favore di C-V2X.
In Italia il decreto Smart Road del 2018 mira all'ammodernamento e all'adeguamento tecnologico di tutta la rete stradale con l'obiettivo, da un lato di realizzare strade connesse e, dall'altro, di sperimentare CAV. Per quanto riguarda la realizzazione di strade connesse, ANAS sta lavorando per introdurre piattaforme di monitoraggio del traffico, modelli di elaborazione dei dati, servizi avanzati ai gestori delle infrastrutture, alla pubblica amministrazione e agli utenti della strada.

Mobility as a service (MaaS)

I sistemi MaaS essenzialmente si servono di modelli digitali per sviluppare una vasta gamma di servizi attraverso modelli realistici di domanda di mobilità, servizi di trasporto e flussi di traffico, aiutando a comprendere le prestazioni attuali e a prevedere le tendenze future con dati provenienti da varie fonti, come i sensori del traffico, i dispositivi GPS e gli orari del trasporto pubblico, per fornire una visione olistica del sistema, aiutando a prendere decisioni informate. Essi possono anche effettuare analisi predittive attraverso dati storici e in tempo reale per mitigare i problemi e pianificare infrastrutture e servizi che i progettisti pubblici e gli investitori privati possono offrire testando diversi scenari in un ambiente virtuale prima di implementare le soluzioni. Infine, possono contribuire a monitorare e controllare in tempo reale il sistema consentendo alle autorità di rispondere rapidamente a incidenti, inconvenienti o interruzioni impreviste.
In tal modo si favorisce anche una più veloce penetrazione tecnologica e di mercato di soluzioni di mobilità connessa, cooperativa, automatizzata (CCAM – Cooperative, Connected and Automated Mobility) ed elettrica, sia applicata alle flotte di car-sharing che al trasporto pubblico locale, potendo contare su una più

rapida e controllata sostituzione del parco veicolare, sempre meno individuale e sempre più gestito da operatori di servizi.
Si possono identificare svariate applicazioni quali:

• **Mobilità a crescente automazione:** Effetti sulla rete dell'automazione della mobilità; sviluppo di logiche di automazione robuste rispetto alla scarsa prevedibilità delle condizioni di traffico e deflusso urbano; integrazione a bordo veicolo e gestione di flotte automatiche di veicoli; ottimizzazione dei servizi automatizzati; integrazione tra sistemi di automazione della guida e sistemi di instradamento e navigazione individuale/personale; integrazione tra flotte automatizzate e servizi non automatizzati di trasporto; automazione dei nodi di park-and-ride, di interscambio modale, di ride-sharing e bike sharing; automazione del trasporto merci e della logistica di ultimo miglio.

• **Ottimizzazione/controllo della mobilità e del deflusso** in reti di traffico a crescente automazione e connessione: ottimizzazione bilanciata di traffico e reti e dell'utilità individuale dei viaggiatori; controllo centralizzato e distribuito del sistema; ottimizzazione a scala ristretta (ad es. singole intersezioni o reti limitate) o su area vasta; integrazione con sistemi di controllo del traffico tradizionali; sviluppo e diffusione di piattaforme per servizi di tipo C-ITS (Cooperative – Intelligent Transportation Systems) in ambito urbano, con servizi di tipo day 1.5 e day; valutazione degli impatti energetici e sulle emissioni clima-alteranti.

• **Veicoli semi-autonomi e autonomi per il trasporto pubblico:** sviluppo di veicoli, sistemi di controllo e automazione, modelli di uso e strumenti modellistici e operativi per l'inserimento dei veicoli e delle soluzioni automatizzate in esercizio; dimensionamento dei servizi; effetto dell'automazione per l'utilità e la user experience dei viaggiatori, attrattività e probabilità di scelte e gradimento; effetti di rete; modifiche delle accessibilità urbane attive e passive; variazione dei costi di produzione e vendita dei servizi; valutazione degli impatti energetici e sulle emissioni clima-alteranti.

• **Testing, validazione, omologazione di veicoli e ret**i a crescente automazione (laboratori, proving ground, strade pubbliche – tecnologie, strumenti e aspetti normativi): metodi, strumenti, norme tecniche di prova e omologazione di veicoli

e sistemi CCAM; strumenti metodologici e operativi; casi d'uso rappresentativi e caratterizzazione parametrica di condizioni di testing; metodologie di progettazione degli esperimenti e controllo della complessità combinatoria; tecniche "per scenario" e tecniche "per simulazione continua"; strumenti integrati di testing in ambienti controllati, protetti, reali e living labs.

- **Analisi e modellazione di comportamenti di spostamento** complessi (activity-based, MaaS e in presenza di sistemi informativi avanzati): gestione e anonimizzazione dei dati, modellazione di nuove modalità di pagamento; analisi sistemica del dato di mobilità per l'impatto ambientale e la sicurezza; sviluppo di modelli misti avanzati di tipo data-driven e model-based.
- **Tecnologie e modelli di funzionamento/uso:** piattaforme di gestione di market-place; sistemi di dematerializzazione e integrazione tariffaria; soluzioni di supporto allo sharing e per la gestione di flotte eterogenee; soluzioni per la gestione a-run-time della intermodalità; modelli di business alternativi (crescita per acquisizioni, integrazione tra operatori, nascita di figura di brookering e di intermediazione della mobilità, etc.); analisi del contesto legislativo e di regolazione del mercato; sostenibilità ed equità sociale; modelli di simulazione intermodali; disponibilità di dati open e regolazione degli access point.

La capacità di offrire e gestire sistemi di trasporto multimodali e multi-operatore, basati sull'integrazione e la sinergia modale, permette di affrontare e risolvere in maniera innovativa problematiche di efficienza ambientale, energetica e di congestione da traffico.

- Dal punto di vista della transizione verde e dell'efficienza energetica, il paradigma MaaS permette una più generale ed efficace elettrificazione del trasporto collettivo
- Dal punto di vista delle sfide tecnologiche, il paradigma MaaS e la sua convergenza con la trasformazione in chiave CCAM comprendono lo sviluppo di piattaforme di integrazione con database molto grandi e inerenti problemi di security e cybersecurity di dati spesso molto sensibili.
- Da un punto di vista industriale, accompagna il passaggio da un settore

principalmente orientato alla produzione di veicoli (e più in generale manifatturiera) a una produzione integrata di manifattura e servizi complessi (dalla vendita di veicoli alla vendita di soluzioni per la mobilità) con relativo impatto sul PIL già superiore a quello della manifattura.

Uno sviluppo sinergico e integrato di veicoli (pubblici e privati) rappresenta un'opportunità per il sistema produttivo italiano per sviluppare piattaforme di automazione e comunicazione, sensoristica, componistica per le flotte e per i servizi di trasporto, piattaforme di interazione e integrazione per gli utenti finali e servizi di mobilità che, rese coerenti e interoperabili da un vero e proprio marchio di qualità nazionale, potrebbe rappresentare un modello di made in Italy nel quale fare riconoscere un'ampia filiera industriale nazionale. Nel caso CCAM, la competizione si sposta dall'innovazione tecnologica pura, nella quale si registra un notevole ritardo competitivo del paese, alla realizzazione di soluzioni tecnologiche complesse e integrate, che sfruttino tecnologie e metodi di base destinati progressivamente a maturare e a diminuire di costo ma in uno scenario caratterizzato da un innalzarsi molto significativo del livello di complessità, sia nella produzione delle soluzioni che nella loro implementazione e gestione.

Tutte le tecnologie ed i servizi prima descritti sono oggi previsti nella pianificazione strategica europea e nelle strategie del Centro Nazionale Mobilità Sostenibile sostenuto dal PNRR e nel Piano Nazionale Ricerca nazionale. Il loro impatto sulla sostenibilità ambientale e sociale dipenderà dalle misure di controllo e accompagnamento finanziario che ne regoleranno l'introduzione e dall'assetto regolamentare e gli standard tecnici, probabilmente globali, necessari a garantire la funzionalità delle soluzioni proposte in un ambito ben più vasto di quello nazionale al fine di giustificare i grandi investimenti necessari a mettere a punto queste complesse soluzioni con tempi per una estesa introduzione in servizio intorno ai 3-5 anni. Gli investimenti previsti sono nell'ordine dei 20-xx M€ per ognuna delle tecnologie citate con l'obiettivo di arrivare a TRL 6, cioè un dimostratore a scala reale in ambiente operativo realistico.

Smart Roads

L'ecosistema CCAM (Connected and Cooperative Autonomous Mobility) nel settore dei trasporti prima citato è legato a due elementi principali: alla guida autonoma attraverso i CAV (vedi sezione dedicata) e alle smart roads che includono la resilienza delle reti infrastrutturali per il trasporto, legata anche al controllo e manutenzione delle infrastrutture.

Le Smart Road consentiranno all'utente di usufruire di servizi informativi sui percorsi alternativi nel caso di incidenti, situazioni di emergenza o congestione, gestione di accessi, segnaletica stradale, parcheggi e rifornimenti (carburante ed elettrico) oltre che, in prospettiva, anche il transito di veicoli a guida autonoma. Un ulteriore servizio dedicato ai gestori sarà quello del monitoraggio strutturale dinamico, elemento di grande importanza e attualità dopo le tragedie avvenute negli scorsi anni, utile ai fini della manutenzione predittiva delle infrastrutture critiche (ponti, viadotti, gallerie, etc.).
L'interazione tra le citate componenti si basa sia su sistemi hardware (ad es. sensori, infrastrutture di comunicazione ed elaborazione dati, come le centrali di controllo), sia su tecnologie abilitanti immateriali quali l'*Internet of Things*, l'IA, la big data analysis e la *cybersecurity,* garantendo la connettività (vedi sezione dedicata) veicolo-infrastruttura (V2I), veicolo-veicolo (V2V), veicolo-rete elettrica (V2G) o, in generale, veicolo-to-everything (V2X).

Sono diversi gli studi presenti in letteratura circa il mercato delle Smart Roads. Uno studio della Mordor Intelligence prevede che la dimensione del mercato crescerà da 46,56 B$ nel 2023 a 115,13 B$ entro il 2028, con un tasso di crescita annuo del 19,85% durante il periodo di previsione (2023-2028).

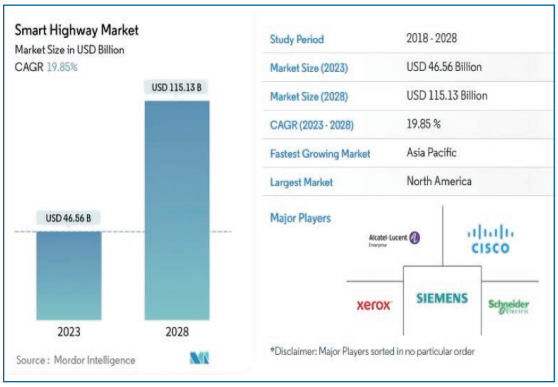


Figura 13: Dimensione del mercato delle smart Roads (Fonte: Smart Highway Market Size & Share Analysis - Growth Trends & Forecasts (2023 - 2028), Mordor Intelligence)[7]

Il tema delle smart roads è elemento centrale dell'agenda digitale e infrastrutturale nazionale e EU. Già dal 2010 la direttiva europea 2010/40/EU aveva dato impulso allo sviluppo di queste tecnologie, seguita solo nel 2018 dal cosiddetto "decreto smart roads" (D.M. n. 70 28/2/2018) che ha avuto una accelerazione con l'aggiornamento nel 2020, sancendo, di fatto, l'avvio della sperimentazione di veicoli a guida autonoma su strada. Il decreto definisce, con orizzonte 2030, le caratteristiche funzionali cui le infrastrutture esistenti e di nuova realizzazione dovranno rispondere per essere considerate Smart Roads. Inoltre, è stato istituito l'Osservatorio per le Smart Roads, con il fine di monitorare il processo di trasformazione e digitalizzazione delle infrastrutture viarie e della sperimentazione dei veicoli a guida autonoma.

In termini di infrastrutturazione sul campo, sono previsti, e indispensabili, corposi investimenti al fine di garantire una connettività con la massima copertura territoriale a minore latenza possibile, in quanto tale parametro definisce poi l'efficienza dinamica tra comunicazione e risposta dei veicoli. Di qui gli investimenti sulla banda larga, tra cui spicca il progetto finanziato dalla EU "Autostrade 5G" relativa all'autostrada del Brennero.

[7] https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/smart-highway-market

L'Italia, in questo settore, è sicuramente all'avanguardia. Entro il 2030 ANAS ha programmato investimenti per circa 1 B€ per la digitalizzazione della propria rete, con un progetto che riguarda la realizzazione di 3000 km di Smart Roads; con orizzonte 2025, ANAS ha previsto un investimento di circa 250 M€, in parte di contributi europei. La prima fase (2025) riguarda, oltre alla Statale 51 "di Alemagna", anche l'itinerario E45-E55 Orte-Mestre, in Sicilia la Tangenziale di Catania e la A19 Autostrada Palermo-Catania, nel Lazio le Autostrade A90 Grande Raccordo Anulare di Roma, A91 Autostrada Roma-Aeroporto di Fiumicino e la A2 Autostrada del Mediterraneo.

Dal punto di vista ambientale, questi interventi prevedono l'utilizzo di energia prodotta da fonti rinnovabili all'interno di "Isole verdi", dove sono previste anche stazioni di ricarica per veicoli elettrici e vertiporti per droni dedicati al monitoraggio del traffico e delle situazioni di rischio. Come emerge dai risultati, le autostrade intelligenti rispetto a quelle tradizionali mostrano una significativa riduzione del consumo energetico, delle emissioni inquinanti e degli incidenti stradali. Si aggiunga la possibilità di un minore consumo di suolo originato dalla maggiore capacità (veic/h) ottenibile, ad esempio, grazie ad un minore headway tra i veicoli a guida autonoma (vedi platooning) e utilizzazione (gestione) dinamica delle corsie di emergenza. La sostenibilità ambientale si rileva anche nell'adozione di materiali innovativi ecocompatibili (altro settore di interesse) per le pavimentazioni e le barriere stradali.

Uno degli aspetti più delicati e controversi è quello relativo ai dati e alla gestione dei flussi informativi (cyber security) che vengono raccolti dall'infrastruttura digitale nell'interazione tra le varie componenti del sistema. Non si tratta del banale dato sulle condizioni meteo o della strada, ma di dati che riguardano la privacy degli utenti, come ad esempio la sua posizione. Da questo punto di vista, occorre evidenziare che la normativa sulla privacy ovviamente stabilisce limiti e obblighi da parte del proprietario dei dati. Attualmente il dato è di chi lo raccoglie, ma nulla vieta che questo dato sia elemento di fornitura di ulteriori servizi primari e/o

ancillari alla mobilità e che, quindi, possa essere elemento condiviso col resto della catena di valore. Occorre rimarcare che da questa prospettiva sarebbe necessaria una riflessione approfondita sul quadro normativo e sulle policy, finanche pensando alla possibilità di "esproprio del dato" per pubblico interesse.

La trasformazione digitale delle infrastrutture permette di migliorare la sicurezza stradale consentendo l'introduzione dei CAV. Se da un lato la Smart Road e la circolazione di veicoli a guida autonoma dovrebbero ridurre il tasso di incidentalità (si stima tra il 50 e il 90%) riducendo la causa legata ai fattori umani (la cui incidenza è stimata nel 94%), dall'altra possibili default di sistema (ad es. in conseguenza di terrorismo informatico) potrebbero essere causa di incidenti o, nella migliore delle ipotesi, di interruzione della circolazione.

Tecnologie di prova ed omologazione, aspetti normativi e valutazione degli scenari operativi

Una volta sviluppati i mezzi autonomi e connessi (CAV) e le infrastrutture di controllo del traffico è necessario organizzare e avere disponibili una serie di strumenti di controllo e standardizzazione delle soluzioni per permetterne la prova in condizioni di riferimento uguali per tutti in modo da tutelare la sicurezza e essere un riferimento tecnico per coloro che vogliono offrire soluzioni specifiche. Bisognerà quindi mettere a punto un vasto numero di metodi, strumenti, norme tecniche di prova ed omologazione di veicoli e sistemi CCAM. Esse devono prevedere strumenti metodologici e operativi adeguati a casi di uso rappresentativi con caratterizzazione parametrica di condizioni di testing che tengano conto delle metodologie di progettazione e della necessità di mettere a punto strumenti integrati di testing in ambienti controllati, protetti, reali e living labs.
A questa infrastruttura normativa e di prova va affiancata naturalmente un sistema di analisi evoluto dei dati di traffico che permetta il controllo degli scenari operativi. Esso deve necessariamente includere la gestione e anonimizzazione dei dati raccolti, opportuna modellazione di nuove modalità di pagamento; analisi sistemica del dato di mobilità per l'impatto ambientale e la sicurezza; sviluppo di modelli misti avanzati di tipo data-driven e model-based.

N. 6 PROPULSIONE STRADALE INNOVATIVA

Nell'ultimo decennio, l'efficienza dei propulsori termici (ICE) per il trasporto di merci e passeggeri (Light Duty Vehicle o LDV) ha visto un incremento di circa il 27%, che si è tradotto in una riduzione di circa il 25% delle emissioni di gas serra (GHG) per unità. Ciononostante, gli LDV sono responsabili in media di circa il 12% delle emissioni totali di CO_2 in EU. Perciò, dal 2023 il Parlamento e il Consiglio europeo hanno adottato un nuovo regolamento 2023/851 che stabilisce vincoli più severi e tempistiche più stringenti per la realizzazione dell'azzeramento delle emissioni di gas serra da autovetture e veicoli commerciali leggeri entro il 2035. Per raggiungere tale obiettivo sono necessarie soluzioni innovative che portino tanto ad implementare sistemi già esistenti quanto a sviluppare tecnologie che vadano ben oltre lo stato dell'arte.

Nel breve termine, l'integrazione del propulsore termico in architetture ibride (HEV- Hybrid Electric Vehicle) rappresenta la soluzione più praticabile, dal momento che ha il vantaggio di ridurre le emissioni senza soffrire delle difficoltà legate alla carenza di infrastrutture per la ricarica veloce, che limitano invece la diffusione dei veicoli puramente elettrici. Inoltre, l'ibridizzazione permettere di superare le barriere di accettazione del consumatore, che sono inevitabilmente connesse alle nuove tecnologie. Tuttavia, per raggiungere i target di impatto ambientale prefissati per il medio e lungo termine è richiesto un ulteriore sforzo: i propulsori innovativi equipaggiati con motori endotermici alimentati da combustibili prodotti da fonti rinnovabili rappresentano una soluzione concreta ed efficace verso la sostenibilità.

e-Fuels

I dettagli sulle tecnologie e processi necessari alla produzione di e-Fuel sono riportati nei volumi della presente collana Airi 2025 "Le Innovazioni del Prossimo Futuro" dedicati a Energia e Decarbonizzazione e Chimica e Materiali. In questa sezione vengono descritte le conseguenze e gli effetti degli e-Fuel sul sistema di trasporto stradale in particolare, che però sono largamente applicabili più in generale sui sistemi di trasporto che usano motori con combustibili fossili, come quello aereo e navale.

Per perseguire l'obiettivo della decarbonizzazione del settore trasporti, l'uso di combustibili sintetici può rappresentare una valida soluzione a breve-medio termine. Conosciuti con diversi nomi, tra cui electrofuels o e-Fuels o anche Power-to-X (PtX), la loro produzione si basa sull'estrazione dell'idrogeno mediante un processo di elettrolisi che scompone l'acqua nei suoi elementi base (idrogeno e ossigeno). In una seconda fase, con l'ausilio della sintesi Fischer-Tropsch, l'idrogeno viene combinato con la CO_2 estratta dall'aria e convertita in un vettore energetico liquido: e-Fuel (Fig. 4). Una volta completata la lavorazione e la raffinazione, l'e-Fuel prodotto può essere utilizzato in varie declinazioni (conformi con l'attuale norma Din En 228), come e-Petrol, e-Diesel, e-Heating ed e-Kerosene, e può sostituire completamente i combustibili convenzionali. Grazie alla loro capacità, gli e-Fuel possono anche essere miscelati con combustibili convenzionali. Tra gli aspetti positivi degli e-Fuel è da considerare che l'attuale infrastruttura di logistica, distribuzione e stoccaggio può rimanere invariata. Inoltre, non sono previste modifiche al sistema propulsivo, per cui non si avrebbe nessun impatto sulla catena produttiva delle aziende impegnate nel settore trasporti e in quello automotive, in particolare. Gli e-Fuel possono essere definiti climaticamente neutri se durante la loro produzione è utilizzata elettricità da fonti rinnovabili ed emessa solo la quantità di CO_2 precedentemente assorbita durante la produzione. Utilizzando e-Fuel da fonti rinnovabili, i propulsori convenzionali potrebbero rientrare nella normativa EU, che al momento ammette dal 2035 l'immatricolazione di veicoli alimentati da combustibili climaticamente neutri.

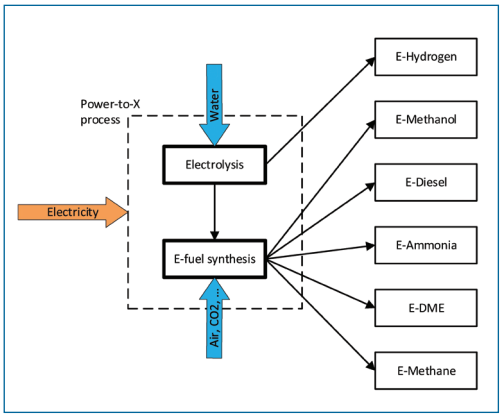


Figura 14: Produzione di E-Fuels
(Fonte: G. Pasini et al., 2023,
https://doi.org/10.3390/batteries9020135)

Il tempo necessario alla loro introduzione è medio, in quanto la soluzione non richiede nessuna modifica alle infrastrutture di logistica, distribuzione e stoccaggio del combustibile. Inoltre, i sistemi propulsivi e quindi i loro processi produttivi rimarrebbero invariati, garantendo posti di lavoro e riducendo al minimo rischi e costi aziendali. Tuttavia, gli e-Fuel non sono ancora disponibili al consumatore, in quanto gli stabilimenti produttivi sono solo 18 in tutto il mondo e chiaramente non sono sufficienti a coprire l'intera richiesta di carburanti; inoltre è da considerare la grande richiesta di energia rinnovabile per la loro produzione che implica precise scelte politiche di indirizzo. Se si considera la situazione attuale, nel 2035 in Europa la disponibilità di carburanti sintetici sarà talmente limitata da alimentare appena il 2% delle auto in circolazione, cioè appena 5 milioni di auto su un totale di 287 milioni circolanti sulle strade europee.

Un altro ostacolo è il costo di produzione che oggi in Germania è pari a 2,841 €/litro, anche se alcune stime parlano di un costo di produzione nel 2050 pari a 1 €/litro. L'uso di e-Fuel permette infine di ridurre la dipendenza da materie prime critiche, che, come quelle utilizzate nelle batterie dei motori elettrici, sono dipendenti da equilibri geo-politici ed economici.

Dal punto vista regolamentare, per quanto riguarda la EU, è stato adottato nel 2023 un emendamento (EU Regulation 2023/851) agli standard di emissioni di CO_2 da veicoli leggeri (LDV) già promulgati nel 2019 (EU Regulation 2019/631). Con questo emendamento, la EU fissa l'obiettivo di riduzione del 100% delle emissioni di CO_2 per tutte le auto e i furgoni di nuova immatricolazione dal 2035 in poi, ma sono tuttavia ammesse le vetture alimentate con carburanti sintetici, e-Fuel, se prodotti come "carbon neutral fuels". Si segnala però come non esistono standard globali per certificare la neutralità climatica in termini di CO_2 e degli impianti di produzione degli e-Fuels. L'investimento necessario per impianti pilota di produzione degli e-Fuel si aggirano nell'ordine di 5-20M€.

Motori alternativi ad idrogeno (H2_ICE)

I propulsori termici equipaggiati con motore alternativo alimentato ad idrogeno (H2_ICE), oltre ad avere il vantaggio di rappresentare l'implementazione di un

sistema consolidato dal punto di vista tecnologico, quale il motore a combustione interna, non richiedono l'alimentazione con gas di elevata purezza, come invece necessario per le celle a combustibili. Tuttavia, allo stato di conoscenze attuali, è necessario realizzare ulteriori passi perché tali sistemi propulsivi possano garantire elevati standard di prestazioni, affidabilità e sicurezza. Mentre i motori endotermici sono una tecnologia consolidata, l'uso dell'idrogeno in un ampio intervallo di condizioni operative richiede lo sviluppo di strategie di iniezione ed accensione specifiche; inoltre è stata evidenziata la necessità di adattare alcuni dei componenti tipici dei propulsori termici, come il turbocompressore, il sistema di ricircolo e di post-trattamento dei gas di scarico. Più in particolare, l'implementazione a partire dai motori ad accensione comandata, richiede un adeguamento del sistema motore e dei suoi componenti a causa delle differenze chimico/fisiche tra l'idrogeno e i combustibili tradizionalmente utilizzati, come la benzina, il gas naturale compresso (CNG) e il gas propano liquido (GPL). Un primo esempio è rappresentato dal sistema di alimentazione, che deve essere adattato e gestito per pressioni e durate di iniezione differenti da quelle utilizzate per i combustibili convenzionali, anche se gassosi. Inoltre, bisogna tener conto di problematiche connesse alla ridotta lubrificazione che comporta l'uso dell'idrogeno, la quale può incidere in modo rilevante sull'usura dei componenti.

Con riferimento al processo di combustione, la minore energia necessaria per l'accensione e la maggiore infiammabilità dell'H_2 permettono di operare con miscele magre; perciò, oltre all'assenza di emissioni di HC e CO_2, per effetto della natura carbon-free del combustibile, si possono avere minori consumi e una compensazione delle emissioni di ossidi di azoto. La combustione con miscele magre, tuttavia, riduce le prestazioni che potrebbero essere incrementate con rapporti di miscela più elevati e con tempi di iniezione più lunghi, incorrendo però in fenomeni di combustione anomala come le preaccensioni, i ritorni di fiamma nel condotto di ammissione dell'aria e la detonazione. Questi effetti rappresentano ancora una sfida alla promozione dell'H2_ICE come sostituto del motore a combustione interna convenzionale. Al momento sono in fase di sviluppo soluzioni innovative (come l'uso di precamere attive e passive o l'uso di

plasmi non-termici per sostenere la combustione ultra-magra) per l'ottimizzazione delle fasi di iniezione ed accensione anche in caso di iniezione diretta del gas ad elevate pressioni e l'adeguamento di dispositivi come il turbocompressore, il sistema di ricircolo e di post-trattamento dei gas di scarico.

Il tempo di introduzione di questa tecnologia è medio in quanto lo sviluppo di propulsori termici ad idrogeno consiste nell'adeguamento di componenti e sistemi ma non la modifica sostanziale di processi produttivi, rispetto a quelli esistenti per motori alimentati da combustibili convenzionali. Diverso è il discorso per la produzione di idrogeno che è trattata in dettaglio nella sezione Energia delle Tecnologie Prioritarie di AIRI. Oggi oltre il 96% di H_2 è prodotto da combustibili fossili (Idrogeno grigio). Il vero potenziale dell'idrogeno come vettore energetico CO_2 neutrale (idrogeno verde) può essere realizzato solo con la produzione a partire da processi di elettrolisi supportati da energia proveniente da fonti rinnovabili (come solare, eolico, geotermico ecc.) come già nel caso degli e-Fuel.

L'H2_ICE può rappresentare una soluzione in grado di garantire posti di lavoro nel settore automobilistico, che altrimnti andrebbero perduti, dato che la maggior parte dei costruttori ha annunciato ufficialmente che il motore convenzionale sarà abbandonato ben prima del 2035 ritenendo non sostenibile investire nello sviluppo della tecnologia per le auto elettriche insieme a quella per i motori tradizionali. Inoltre, l'H2_ICE apre anche a nuove opportunità industriali e occupazionali derivate dalle specifiche novità tecnologiche necessarie per la sua implementazione su larga scala e in diversi segmenti del trasporto su strada. Per queste ragioni lo sviluppo di propulsori alimentati da un "carbon-free fuel" come l'idrogeno rientra pienamente nelle linee strategiche del PNRR opportunamente declinate del Centro per la Mobilità Sostenibile.

Dal punto vista regolamentare vale integralmente la discussione fatta nel caso degli e-Fuel. Nel 2023, la EU ha adottato un emendamento (EU Regulation 2023/851) agli standard di emissioni di CO_2 da veicoli leggeri (LDV) già promulgati nel 2019 (EU Regulation 2019/631) che fissa l'obiettivo di riduzione del 100% delle emissioni di CO_2 per tutte le auto e i furgoni di nuova immatricolazione dal

2035 in poi. Inoltre, l'attuale obiettivo di riduzione della CO_2 per il 2030 è stato rafforzato a -55% per le auto e a -50% per i furgoni, rispetto al livello di riferimento del 2021. L'investimento necessario per sviluppare motori H2_ICE a TRL 6 è stimato variare da 5 a 20 M€.

Split-Cycle-Engine

La tecnologia Split-Cycle Engine si basa un concetto rivoluzionario di motore a combustione interna: in essa, infatti, il ciclo quattro tempi tradizionale viene eseguito su due cilindri. Le corse di aspirazione e compressione avvengono in un primo cilindro e il gas compresso viene poi inviato in un secondo cilindro dove si completa il ciclo con le corse di espansione e scarico. Tale modalità di funzionamento consente di operare con due diversi rapporti di compressione ed espansione e di offrire un'efficienza teorica paragonabile a quella del ciclo Brayton. La flessibilità del sistema permette anche di aggiungere uno scambiatore di calore tra i due cilindri per il recupero del calore perso che può essere utilizzato per riscaldare l'aria attraverso un recuperatore. I primi progetti di motori Split-Cycle risalgono alla fine del secolo scorso, ma alcune difficoltà realizzative ed intrinseche limitazioni architettoniche ne hanno determinato la scarsità di esempi funzionanti. Una delle maggiori sfide è consentire che la carica di aria compressa entri nella camera di espansione nel più breve tempo possibile, iniettare la quantità necessaria di carburante, mescolarla adeguatamente con l'aria, e quindi avviare la combustione prima che inizi la fase di espansione. Il tempo totale di questi processi pone un limite superiore in termini di regime massimo di rotazione e di densità di potenza.

L'interesse commerciale verso tale concetto è invece cresciuto negli ultimi anni in ragione delle sue potenzialità in termini di aumento della efficienza termica (che può teoricamente raggiungere il 60%), riduzione dei consumi (direttamente collegato alle emissioni di CO_2). La necessità di sviluppare ed esplorare sia nuove soluzioni sia quelle che non sono ancora state implementate nella produzione industriale, ha fatto sì che il motore Split-Cycle riguadagnasse recentemente particolare attenzione da parte dei ricercatori accademici ed industriali, grazie ai suddetti potenziali vantaggi.

La tecnologia, una volta resa matura, potrà trovare spazio in svariati settori, quali il navale, le macchine operatrici ed i veicoli commerciali stradali a medio e lungo raggio, determinandone un elevato impatto sulla filiera industriale metalmeccanica. In particolare, sono potenzialmente coinvolti il settore della produttività, con conseguente risvolti in ambito occupazionale. Un limite è la complessità dell'architettura del sistema. Tuttavia, lo sviluppo futuro deve garantire durabilità ed affidabilità della componentistica aggiuntiva (valvole di scarico, iniettore specifico, scambiatore di calore).
Lo sviluppo di propulsori con architetture innovative rientra pienamente nelle linee strategiche del PNRR e concorre al rispetto della regolamentazione europea prima citata (EU Regulation 2023/851) relativa agli standard di emissioni di CO_2 da veicoli leggeri (LDV) già promulgati nel 2019 (EU Regulation 2019/631). L'investimento necessario per sviluppare motori Split-Cycle-Engine a TRL 6 è stimato variare da 10 a 30 M€.

6/7

Free Piston Linear Engine

Il Free Piston Linear Generator è una tecnologia innovativa di motore a combustione interna che può rappresentare una valida soluzione per la transizione verso scenari energetici più sostenibili. In particolare, può essere utilizzato in applicazioni di veicoli elettrici ibridi (HEV). Il suo principio di funzionamento si basa sulla'assenza del manovellismo di spinta per la conversione del moto lineare del pistone a quello rotativo della manovella. Il pistone è quindi libero di sviluppare la corsa in assenza di qualsivoglia vincolo meccanico ed il sistema cilindro-pistone è direttamente accoppiato a una macchina elettrica di tipo lineare. Il moto alternato del pistone produce quindi una corrente negli avvolgimenti dello statore grazie alla variazione di flusso magnetico, consentendo la generazione di energia elettrica. Esso può essere utilizzato come generatore stazionario di energia o come *range extender* in veicoli elettrici ibridi.

Nell'architettura più semplice attualmente realizzabile (*single-piston configuration*) il sistema si compone di una camera di combustione, un dispositivo di rimbalzo a gas, un pistone equipaggiato con anelli magnetici ed una macchina elettrica lineare.

Pur essendo un sistema basato sulla combustione, grazie all'assenza del manovellismo si osserva una notevole riduzione delle inerzie, dei pesi e degli attriti in gioco; ne consegue una conversione energetica (da chimica ad elettrica) più diretta rispetto ad una soluzione convenzionale. Grazie alla natura balistica del sistema, si ha la possibilità di realizzare un rapporto di compressione variabile, aprendo un ampio scenario sulla gamma di combustibili utilizzabili, rendendo la tecnologia *fuel-flexible*. Anche se il primo brevetto di motore Free Piston risale al 1928, ha trovato solo recentemente un riscontro commerciale come generatore di energia (la Mainspring Inc. l'unica azienda che produce questo tipo di macchina). Attualmente, la ricerca in tale settore è rivolta soprattutto allo sviluppo di soluzioni prototipali in grado di superare le difficoltà legate alla reale applicazione di tale tecnologia, quali il controllo della dinamica del pistone, il processo di starting, l'accurata miscelazione del combustibile, ecc.

Le peculiari caratteristiche della tecnologia (in primis il rapporto di compressione variabile, come anticipato) la collocano tra le soluzioni più interessanti in ambito di sostenibilità ambientale, laddove si utilizzino combustibili carbon free, quali l'idrogeno verde e l'ammoniaca.

Si prevede che la diffusione di questa tecnologia per applicazioni mobili o nel campo dei gen-set possa avvenire nell'arco dei prossimi cinque-dieci anni.

Come per la tecnologia Split-cycle, lo sviluppo di propulsori con architetture innovative rientra pienamente nelle linee strategiche del PNRR e concorre al rispetto della regolamentazione europea prima citata (EU Regulation 2023/851) relativa agli standard di emissioni di CO_2 da veicoli leggeri (LDV) già promulgati nel 2019 (EU Regulation 2019/631). L'investimento necessario per sviluppare motori Free-Piston a TRL 6 è stimato variare da 20 a 100 M€ in virtù del basso TRL di partenza.

N. 7 TRASPORTO TERRESTRE DELLE MERCI

Le statistiche Eurostat hanno registrato in Europa, nel decennio 2011-2021, un costante aumento della quantità di merci trasportate su gomma (+20% in termini di tonnellate per km), mentre nello stesso periodo il trasporto merci su ferro è rimasto sostanzialmente invariato.
Di conseguenza la ripartizione modale nel trasporto terrestre delle merci (escludendo quindi navi e aerei, ma includendo le vie d'acqua interne) rimane a netto vantaggio della strada, che ha incrementato lentamente la propria quota percentuale negli ultimi anni: nel 2021 in Europa il 77,3% delle merci trasportate (in tonnellate per km) ha viaggiato su strada, il 17% su ferrovia e il 5,7% su vie d'acqua interne.
Il trasporto su strada prevale oggi in Europa anche sulle lunghe distanze: nel 2019 il 57,1% delle merci trasportate (in tonnellate per km) su distanze maggiori di 300 km ha utilizzato la strada; la percentuale scende al 17,7% se si considerano le distanze superiori ai 1000 km.

Nel seguito viene fornita una panoramica dei principali problemi ed aree di intervento tecnico, infrastrutturale e normativo necessarie a sostenere lo scenario del trasporto stradale delle merci. I dettagli sulle specifiche tecnologie necessarie ed abilitanti all'implementazione di questo scenario sono invece discussi negli scenari 1-6 prima descritti cui si rimanda anche per gli investimenti necessari all'innovazione.

Tutti i documenti programmatici della EU che affrontano il tema del trasporto merci auspicano un riequilibrio modale (shift modale) tra gomma e ferro; ad esempio, la "Sustainable and Smart Mobility Strategy 2020 (COM (2020) 789 final)" indica l'obiettivo di un aumento del 50% del traffico merci su ferro entro il 2030 e di un raddoppio entro il 2050. Alcuni studi recenti prevedono in Europa, nei prossimi 30 anni (fino al 2050), un aumento generalizzato del traffico totale delle merci per tutte le modalità di trasporto (inclusa la ferrovia), ma con una ripartizione modale gomma-ferro invariata rispetto ai valori attuali.

Un sistema razionale ed efficiente di trasporto delle merci dovrebbe mirare a integrare al meglio le due modalità strada-ferrovia, esaltando i vantaggi di entrambe. La flessibilità e capillarità del trasporto su gomma è indispensabile per la copertura integrale del territorio, per il trasporto di ultimo miglio e dove non esiste un servizio ferroviario; il trasporto ferroviario, utilizzando al meglio l'infrastruttura esistente, è in grado di offrire un servizio rapido e sicuro soprattutto sulle medie e lunghe distanze e, integrandosi opportunamente con il trasporto stradale, potrebbe consentire a quest'ultimo una maggiore efficienza, minori costi di gestione e di manutenzione.
Malgrado questi innegabili vantaggi, le prospettive di sviluppo del trasporto merci su ferrovia appaiono limitate. La EU ne è consapevole, auspicando nei documenti ufficiali lo shift modale ferro-gomma quasi esclusivamente come azione per la decarbonizzazione[9], mentre viene lasciato in secondo piano l'effetto benefico che esso produrrebbe sulla riduzione dei costi esterni del trasporto stradale:

- minore incidentalità;
- minore congestione, e in generale un miglioramento delle condizioni di sicurezza;
- minore necessità di infrastrutture stradali e conseguenti minori costi per la loro manutenzione;
- minore consumo di suolo;
- minore inquinamento dell'aria e acustico, nel complesso una migliore qualità della vita non solo nei centri urbani.

Non dimentichiamo, inoltre, l'enorme patrimonio costituito dall'infrastruttura ferroviaria europea, che sarebbe pienamente valorizzato da un riequilibrio modale a vantaggio della ferrovia.

Tecnologie per il trasporto ferroviario

Le problematiche dell'attuale offerta del trasporto ferroviario delle merci sono evidenziate con grande efficacia in due relazioni della Corte dei Conti Europea

[8] Ad esempio, il "Transport and environment report 2022" della European Environment Agency e lo studio del Parlamento Europeo "Modal shift in European transport: a way forward" (2018).

[9] Nel 2019 gli autocarri pesanti hanno prodotto il 4,5% delle emissioni totali di gas serra nell'Unione Europea; la percentuale sale al 6,3% se si considerano anche gli autocarri leggeri.

(alle quali si rimanda per approfondimenti): la relazione del 2016 "Il trasporto delle merci su rotaia nell'UE non è ancora sul giusto binario" e la più recente relazione speciale del 2023 "*Trasporto intermodale delle merci - Il cammino dell'UE verso la riduzione del trasporto merci su strada è ancora lungo*".

Secondo la Corte dei Conti Europea, la stagnazione del settore ferroviario può essere spiegata in parte dall'esistenza di barriere giuridiche che limitano la concorrenza (compreso il regime di accesso alle linee, la tassazione, etc.), ma anche da problemi di natura operativa e tecnica, che incidono sulla capacità complessiva e sulle prestazioni.

Per migliorare l'attuale offerta di trasporto ferroviario delle merci in Europa si sta puntando a un'innovazione infrastrutturale, organizzativa e tecnologica. Si cerca di ottenere una maggiore produttività, una minore durata del trasporto (attualmente la velocità media è di circa 18 km/h), la riduzione del tempo di formazione/decomposizione del treno, un aumento della lunghezza dei convogli, una maggiore puntualità delle consegne a prezzi competitivi, il superamento dei problemi di interoperabilità, e l'ottimizzazione delle infrastrutture esistenti.

Grande rilievo tra i programmi di sviluppo europei assumono la digitalizzazione e l'automatizzazione del trasporto ferroviario delle merci. La composizione del treno, che oggi viene fatta manualmente e richiede molte ore, potrà essere automatizzata mediante l'accoppiamento automatico digitale (*DAC - Digital Automatic Coupler*), tramite il quale possono connettersi linee di alimentazione e linee dati. La digitalizzazione riguarda ogni aspetto del processo, come la diagnostica e manutenzione, le ispezioni tecniche, il monitoraggio e la localizzazione dei convogli. L'offerta convenzionale di trasporto delle merci su ferrovia, seppur migliorata dalle innovazioni appena citate, è però affetta da alcune rigidità che inevitabilmente ne limitano le possibilità di sviluppo.

Infatti, per spedire delle merci su ferrovia, oggi il cliente deve stipulare un contratto di lungo termine con la compagnia ferroviaria, deve prenotare un intero treno o una porzione di esso e concordare con la compagnia ferroviaria il viaggio da effettuare (non esiste un programma ferroviario con orari prefissati come nel trasporto passeggeri). I trasporti riguardano grandi quantità di merci omogenee,

i viaggi si svolgono quasi sempre di notte; non è possibile prenotare all'ultimo momento, né inviare piccole quantità di merci. Ne consegue che l'attuale offerta di trasporto merci su ferrovia è adatta solo ai grandi clienti che devono inviare importanti quantità di merci con viaggi programmati da tempo. I piccoli clienti non possono usufruire di questo servizio, e non hanno alternative al trasporto su strada.
Per superare queste limitazioni sarebbe necessario ragionare su un nuovo modello di offerta merci su ferrovia che sia aggiuntivo rispetto all'offerta convenzionale, con caratteristiche del tutto innovative e in grado di attrarre le merci che oggi viaggiano su strada con un servizio intermodale rapido, frequente, puntuale, semplice e accessibile.

Tecnologie per il trasporto stradale

Il trasporto stradale, infatti, sta affrontando una transizione per ridurre le emissioni, sfida che richiederà notevoli investimenti privati e incentivi pubblici. La sua interconnessione con il trasporto stradale in ottica multimodale potrebbe migliorare la competitività di entrambi, soprattutto in questa fase di profonda trasformazione tecnologica.
La trasformazione non presenta particolari ostacoli nel caso dei veicoli commerciali leggeri, utilizzati per le percorrenze brevi in contesto urbano o regionale, per i quali sembra emergere la tendenza ad utilizzare la propulsione ibrida nell'immediato e totalmente elettrica nel medio termine.
Molto più critica è la transizione per i veicoli pesanti impiegati su lunghe percorrenze, per i quali la propulsione esclusivamente elettrica con accumulo elettrochimico non è praticabile e si dovranno utilizzare soluzioni diverse, che avranno costi tutt'altro che trascurabili per le imprese e per i contribuenti. Le soluzioni prospettate riguardano la propulsione ibrida (motore diesel-elettrico alimentato con carburanti alternativi) e l'utilizzo di *fuel cells* alimentate ad idrogeno "verde" (prodotto mediante elettrolisi con utilizzo di energia elettrica da fonti rinnovabili). Nei propulsori ibridi si tende a escludere l'uso di biocarburanti di origine vegetale, per l'impatto che le coltivazioni a uso energetico potrebbero avere sugli ecosi-

stemi; sembrano preferibili i carburanti sintetici prodotti mediante uso di energia elettrica rinnovabile (*e-fuels*). Sull'uso degli e-fuels si segnala però la posizione estremamente critica dell'istituto di ricerca tedesco Fraunhofer Institute, che evidenzia gli enormi costi e le problematiche ambientali legate a questa scelta[10].
Notoriamente, la propulsione ibrida consente un recupero di energia in frenata, che nei percorsi cittadini può raggiungere il 15-20%, mentre nei veicoli industriali a lunga percorrenza, che viaggiano a velocità costante, il recupero arriva solo al 4-5% (percentuale, comunque, non disprezzabile su questi mezzi che percorrono milioni di km). Per i veicoli pesanti si prospettano solitamente soluzioni di tipo *mild-hybrid* (con potenza del motore elettrico dell'ordine del 20% rispetto alla potenza del motore a combustione interna).
Le *fuel cells* alimentate a idrogeno sono una tecnologia ormai nota, utilizzabile in un futuro non troppo lontano per la propulsione dei veicoli industriali pesanti. Si segnala su questo tema un interessante progetto europeo di tipo dimostrativo, denominato "*H2 Accelerate Trucks*", che ha lo scopo di mettere in circolazione 150 mezzi pesanti alimentati a idrogeno prodotti da tre costruttori europei (IVECO, DAIMLER e VOLVO). I veicoli trasporteranno merci di ogni tipo lungo il corridoio Scandinavia-Italia, con l'obiettivo di raccogliere dati sperimentali e informazioni che saranno utili agli operatori del settore e alle autorità che dovranno installare le infrastrutture di ricarica[11].
Altre innovazioni riguardanti i veicoli industriali pesanti riutilizzano in ambito stradale caratteristiche tipiche della ferrovia, come l'alimentazione tramite pantografo dei veicoli pensanti o il loro accorpamento in convogli.
Infatti, si propone l'elettrificazione delle autostrade, ossia l'installazione di una linea di alimentazione elettrica sopra la prima corsia dell'autostrada (simile all'alimentazione ferroviaria) dalla quale i veicoli pesanti (con propulsione elettrica o ibrida) dotati di pantografo possano alimentarsi durante il percorso, per poi staccarsi quando escono dall'autostrada. Questa soluzione, proposta inizialmente da Siemens, sembra avviata a concrete applicazioni. Una possibile controindicazione potrebbe essere l'usura accelerata del manto stradale dovuta al carico ripetuto e concentrato su alcuni punti della strada, con conseguenti costi elevati di manu-

[10] *Press release "Large-scale use of e-fuels in cars and trucks does not make sense" https://www.isi.fraunhofer.de/en/presse/2023/presseinfo-05-efuels-nicht-sinnvoll-fuer-pkw-und-lkw.html*

[11] *https://h2accelerate.eu/*

tenzione.
Altra soluzione di tipo wireless per elettrificare le autostrade consiste nel posizionare delle spire pochi centimetri sotto l'asfalto per realizzare una ricarica induttiva dinamica. Questa proposta, ancora in fase sperimentale, potrebbe adattarsi anche alle automobili, lasciando intravedere interessanti scenari di guida autonoma maggiormente garantita.
Per efficientare lo spostamento dei mezzi pesanti c'è poi il cosiddetto "*platooning*": organizzare un convoglio di veicoli pesanti che viaggiano in colonna, in cui il primo è presenziato da un conducente, mentre gli altri sono senza conducente e seguono il primo con la stessa andatura e a distanza fissa. Sono necessarie una tecnologia V2V (*vehicle-to-vehicle*), che permetta ai veicoli di comunicare, e una tecnologia V2I (*vehicle-to-infrastructure*), che consenta al veicolo di dialogare con l'infrastruttura per capire cosa c'è intorno e interagire in sicurezza con l'ambiente circostante. Il vantaggio teorico del platooning riguarda soprattutto la riduzione della distanza tra veicoli, che aumenta la capacità della strada e permette di ridurre la resistenza aerodinamica (e quindi i consumi). Nella realtà pratica sembrerebbe però che la distanza ottimale tra i veicoli non possa scendere al di sotto di certi valori per motivi di sicurezza, e ciò attenua i vantaggi citati.
Tutte le tecnologie citate sono applicabili soltanto ai nuovi veicoli; tuttavia, il parco di veicoli industriali è costituito in gran parte da mezzi vecchi ancora funzionanti, che probabilmente rimarranno sulle strade ancora per molti anni. È quindi necessario agevolare il *retrofit* dei veicoli esistenti, anche utilizzando soluzioni transitorie di rapida attuazione, come ad esempio l'uso del GNL (gas naturale liquefatto).
Il GNL produce il 15-25% in meno di CO_2 rispetto al gasolio, con forte riduzione degli altri inquinanti (-90% di particolato, riduzione quasi totale di ossidi di zolfo e azoto). Un mezzo pesante euro 5/6 può essere facilmente adattato e reso bi-fuel (gasolio-GNL). Le maggiori necessità di investimento in questo settore riguardano l'infrastruttura di approvvigionamento e di distribuzione del combustibile.

SOCI AIRI >

SOCI SOSTENITORI

BRACCO
CNR - CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE
MAPEI
PIRELLI

ORGANIZZAZIONI DI IMPRESE

FARMINDUSTRIA
FEDERCHIMICA
UNIONCAMERE

ISTITUTI FINANZIARI

INTESA SANPAOLO

ENTI PUBBLICI DI RICERCA E UNIVERSITÀ

AREA SCIENCE PARK
CENTRO NAST
CSGI
ENEA
INAIL
POLITECNICO DI TORINO - CHILAB
SCUOLA NORMALE SUPERIORE DI PISA
UNIVERSITÀ DI PISA

INDUSTRIE E CENTRI DI RICERCA

BAIC AGRO ITALIA
BIOTECNOMED
BYRON'S HOLDING
BRACCO IMAGING
BREMBO
CAMOZZI AUTOMATION
CENTRO RICERCHE FIAT
CEREAL DOCKS
CERTIMAC
CONSORZIO ITALBIOTEC
CRSLAGHI
CETMA
CIRA
COLOROBBIA CONSULTING
COMSOL
DIASORIN
DOMPÉ
ECOR INTERNATIONAL
ELETTRA SINCROTRONE TRIESTE
E.M.A
ERICSSON TELECOMUNICAZIONI
FINCANTIERI
FONDAZIONE CAVALIERI OTTOLENGHI
FONDAZIONE BRUNO KESSLER
FONDAZIONE PIEMONTE INNOVA
GEWISS
GIUSTO FARAVELLI
INNOVHUB STAZIONI SPERIMENTALI PER L'INDUSTRIA
IVECO
LFOUNDRY
MECCANO
MEMC ELECTRONIC MATERIALS - GLOBALWAFERS COMPANY

**Situazione soci aggiornata a dicembre 2024*

MENARINI SILICON BIOSYSTEMS
METTLER TOLEDO
PIRELLI TYRE
PROGEST
SAES GETTERS
SAIPEM
SMILAB
SPEA
STMICROELECTRONICS
TECNOALIMENTI SOCIETA CONSORTILE PER AZIONI
THALES ALENIA SPACE ITALIA
TODARO INDUSTRY
TXT E-TECH

START UP INNOVATIVE

AIENG
ARCHA SRL
ASSING
COSBERG
ECOR INTERNATIONAL
ENERTECH SOLUTION
EPSILON
IUVO
JONIX
KLASTER
MARITIME TECHNOLOGY CLUSTER FVG
NATIVE TO WEAR
NEXT TECHNOLOGY TECNOTESSILE SRL
NICHE SRL
NVNOVA
PLASTICA ALFA
SULTAN
TECHNETIC ITALIA

SOCIETÀ DI CONSULENZA

AYMING ITALIA
BUGNION
FI GROUP ITALIA
FINSERVICE
LUNATI & MAZZONI
SERVICE GROUP R&D
STUDIO PROMOZIONI
STUDIO TRIBUTARIO E SOCIETARIO DELOITTE
TINEXTA INNOVATION HUB

Airi promuove la ricerca industriale e l'innovazione tecnologica in Italia e in Europa.
Previsioni tecnologiche, policy, networking e tecnologie emergenti.

Scopri di più su www.airi.it

Airi
ASSOCIAZIONE ITALIANA PER LA RICERCA INDUSTRIALE
50
1974 2024





















Isbn 978-88-98935-74-1
9 788898 935741