



Prospettive di Sviluppo del Sistema Energetico nel Settore Trasporti al 2050



Prospettive di Sviluppo
del Sistema Energetico
nel Settore Trasporti
al 2050



Indice

1. Introduzione	4
2. Principali sfide nel settore trasporti	7
3. Quadro normativo	11
4. Stato attuale	17
5. Evoluzione del settore trasporti al 2040	31
6. Interazione con referenti di settore	37
7. Tecnologie chiave per la decarbonizzazione del settore	41
8. Prospettive di sviluppo al 2050	59



1. Introduzione

La presente nota è parte di una serie di approfondimenti dedicati alle prospettive di sviluppo del settore energetico italiano al 2050. Il lavoro costituisce un adempimento alla Delibera 392/2024 di AERERA, che ha richiesto a Snam e Terna di sviluppare note tecniche che illustrino le prospettive plausibili di sviluppo del sistema, supportate da considerazioni quantitative con rappresentazione dei dati a livello nazionale.

In ottemperanza a tale prescrizione, Terna e Snam hanno sviluppato note tecniche* (di seguito “note”) relativamente a:

- i consumi nel settore civile;
- i consumi nel settore industriale;
- i consumi nel settore trasporti;
- la copertura dei consumi elettrici (incluso lo sviluppo della capacità di accumulo);
- la copertura dei consumi gas (incluso lo sviluppo degli stoccaggi multi-molecola e ruolo della CCS).

Le note considerano quanto già previsto fino al 2040 nel Documento di Descrizione degli Scenari 2024 (di seguito DDS 2024) e si focalizzano su alcune delle principali sfide che i diversi settori dovranno affrontare per raggiungere gli obiettivi di decarbonizzazione fissati per il 2050, tenendo conto degli indirizzi di policy energetica nazionale e dei relativi documenti disponibili al momento della stesura della nota (e.g. Piano Nazionale Integrato Energia e Clima 2024, Strategia Nazionale Idrogeno 2024) e delle direttive e dei regolamenti a livello comunitario in materia di politica energetica ambientale per il raggiungimento della neutralità carbonica al 2050. Un ulteriore documento che riguarda gli obiettivi 2050 è rappresentato dalla Strategia Italiana di Lungo Termine, pubblicata a Gennaio 2021, che mira a delineare i possibili percorsi per raggiungere la neutralità climatica al 2050. È previsto un aggiornamento di tale documento per allinearli ai nuovi obiettivi europei di riduzione netta delle emissioni di gas serra entro Gennaio 2026.

Nell’ambito del processo di elaborazione delle note, Snam e Terna hanno, inoltre, avviato una discussione con un campione rappresentativo di soggetti rappresentativi dei settori sopracitati al fine di rendere le valutazioni il più possibile complete e robuste.

La presente nota si focalizza sul settore dei trasporti analizzandone la struttura settoriale, identificando i differenti sottosettori che lo costituiscono: trasporti nazionali e internazionali, trasporto merci e passeggeri, trasporti terrestri su strada, ferroviario, aviazione, navigazione.

Più in dettaglio la presente nota fornirà una indicazione quantitativa delle possibili evoluzioni dei consumi legati ai trasporti nazionali su strada, passeggeri e merci, verso l’obiettivo di decarbonizzazione previsto al 2050.

* Le note dei tre settori di consumo sono sviluppate congiuntamente, mentre le note di copertura della domanda sono state sviluppate separatamente per quanto di competenza del TSO di riferimento





2

Principali sfide
nel settore trasporti



2. Principali sfide nel settore trasporti

Negli ultimi anni, i consumi del settore trasporti, così come le emissioni di CO₂ associate, sono rimasti pressoché costanti (ad eccezione del 2020, come conseguenza della pandemia COVID). Questo è dovuto principalmente all'aumento della domanda di mobilità, solo in parte compensato dai miglioramenti tecnologici nell'efficienza dei veicoli e dall'introduzione di normative ambientali più stringenti.

Nel 2022, i consumi energetici del settore trasporti sono stati pari a 36,7 Mtep rappresentando circa il 36% del totale dei consumi finali nazionali. La quota maggiore, 34,3 Mtep, è da imputare ai consumi per il trasporto su strada, dove i vettori principalmente in uso, a oggi, sono la benzina e il gasolio.

Il settore dei trasporti è responsabile di quasi il 30% delle emissioni di gas serra nazionali, con una forte dipendenza di tale settore dai combustibili fossili.

Particolare attenzione viene quindi posta al settore per cercare di ridurre progressivamente l'impatto ambientale e climatico, agendo su diversi fronti: dallo sviluppo tecnologico, favorendo soluzioni alternative ai motori a combustione interna (sistemi di trazione elettrica, ibrida o a fuel cell) al tema dei carburanti attraverso obblighi crescenti di ricorso a biocarburanti in sostituzione di carburanti petroliferi, fino ad arrivare alla modalità di utilizzo dei mezzi di trasporto, incentivando la mobilità collettiva tramite il potenziamento dell'offerta del trasporto pubblico, a discapito della mobilità privata.

Negli ultimi anni si è osservata una limitata diffusione dei veicoli elettrici puri mentre, più significativa, è stata quella dei veicoli ibridi. Tuttavia, se l'impatto sull'abbattimento delle emissioni climalteranti è indubbio per i primi, lo stesso non vale per i secondi, il cui impatto effettivo sulla riduzione delle emissioni dirette è legato all'utilizzo che il singolo cittadino decide di farne. Sul fronte del trasporto urbano, invece, l'adozione di veicoli a basso impatto ambientale da parte di alcune flotte pubbliche e commerciali, una progressiva introduzione al consumo di biocarburanti in blending con carburanti convenzionali hanno mostrato andamenti crescenti negli ultimi anni.

Nei prossimi 25 anni, stante la vigente legislazione europea e nazionale, l'obiettivo prevede di azzerare le emissioni associate a questo settore.



Il raggiungimento di tale obiettivo di lungo termine mette in evidenza le principali criticità che dovranno essere superate. In primis, nel trasporto su gomma, l'elevata penetrazione dei motori a combustione interna, che oggi sono alimentati con combustibili tradizionali di origine fossile: gasolio e benzina rappresentano circa il 90% dei consumi del settore.

A questo si associa la scarsa efficienza del parco circolante, dovuta alla sua vetustà che per l'Italia è tra le più alte in Europa, e i costi ancora elevati legati all'acquisto di veicoli elettrici, sia per quanto riguarda l'investimento iniziale, superiore rispetto ai veicoli a combustione interna, sia per quanto riguarda il costo della ricarica soprattutto per chi non ha la possibilità di utilizzare il proprio contratto di utenza domestica.

Infine, vanno considerati come ostacoli alla transizione sia una forte resistenza al cambiamento delle abitudini di mobilità sia alcune incertezze sul quadro normativo che contribuiscono a condizionare le scelte strategiche per il futuro sul lato della domanda e dell'offerta dei veicoli.

Ci sono poi sottosettori dei trasporti, particolarmente difficili da decarbonizzare anche da un punto di vista tecnologico, come l'aviazione e il trasporto marittimo, per i quali le soluzioni a emissioni ridotte o nulle esistono, ma non hanno lo stesso grado di maturità e diffusione di quelle disponibili per il trasporto su strada. In parallelo, poi, anche porti e aeroporti dovrebbero adattarsi alle nuove tecnologie e ai vettori energetici in uso.

Al netto di questi ultimi, che richiedono probabilmente un ulteriore sviluppo delle tecnologie disponibili per il processo di decarbonizzazione dei trasporti, sarà fondamentale promuovere la progressiva sostituzione dei combustibili fossili con fonti energetiche rinnovabili, incentivare il rinnovo del parco veicoli con mezzi più efficienti e a basse emissioni, rendere economicamente accessibili le nuove tecnologie, promuovere un cambiamento culturale nelle abitudini di mobilità e definire un quadro normativo stabile e coerente, in grado di offrire certezze agli operatori del settore e stimolare investimenti di lungo periodo.



3

Quadro normativo



3. Quadro normativo

3.1 Europeo

Il quadro normativo europeo in merito alla decarbonizzazione del settore dei trasporti rappresenta uno dei pilastri della transizione ecologica promossa dall'Unione Europea (UE), in linea con l'obiettivo della neutralità climatica al 2050 definito dal Green Deal Europeo. Per raggiungere tale traguardo, l'UE ha introdotto una combinazione articolata di iniziative legislative, individuando target di riduzione emissiva e immissione in consumo. I principali riferimenti normativi e di indirizzo strategico a livello europeo sono:

- **Green Deal Europeo:** stabilisce l'obiettivo di ridurre le emissioni prodotte dai trasporti del 90% rispetto al 1990 entro il 2050. Il settore dei trasporti è uno dei principali destinatari delle misure che introducono target emissivi e delle iniziative per sviluppare l'utilizzo di veicoli elettrici, di carburanti alternativi e rinnovabili.
- **Mobility Strategy:** entro il 2050, l'UE mira a realizzare un sistema di trasporto smart, sostenibile e resiliente attraverso 82 iniziative in 10 aree strategiche. Gli obiettivi, entro il 2050, prevedono il raddoppio del traffico ferroviario (passeggeri e merci), una rete TEN-T (Trans-European Networks - Transport) multimodale pienamente operativa per un parco veicoli a zero emissioni, l'uso di carburanti sostenibili e adeguate infrastrutture di ricarica o rifornimento
- **TEN-T Regulation:** regolamento chiave per la pianificazione e lo sviluppo della rete di trasporto multimodale a livello europeo, relativo a trasporto marittimo, aereo, via treno e stradale. Definisce i requisiti minimi che devono essere rispettati per lo sviluppo dell'infrastruttura.
- **Pacchetto "Fit for 55":** un insieme di Regolamenti e Direttive europee con carattere normativo vincolante a livello nazionale volte a ridurre le emissioni del 55% entro il 2030 rispetto ai livelli del 1990. Questo pacchetto aggiorna e introduce strumenti chiave per la politica energetica volta a decarbonizzare il settore dei trasporti, quali la riforma del sistema europeo di scambio delle emissioni (ETS) e la revisione della Direttiva sulle energie rinnovabili (RED III). A livello cross settoriale i dossier con impatto sul settore dei trasporti sono:
 - **La Renewable Energy Directive (RED III) – 2023/2413:** dispone che, entro il 2030, ogni Stato membro dovrà garantire che i combustibili rinnovabili immessi in consumo e l'elettricità rinnovabile permettano di raggiungere o una quota minima del 29% di energia rinnovabile nei consumi finali oppure una riduzione dell'intensità di GHG almeno del 14,5% rispetto ai valori di riferimento stabiliti, imponendo sui fornitori di carburante quote combinate di biocarburanti avanzati, biogas e RFNBOs (Renewable Fuels of Non-Biological Origin – combustibili rinnovabili di origine non biologica).



- **L'Emission Trading System (ETS) 2023/959:** estende il sistema per lo scambio di quote di emissioni di gas a effetto serra, già vigente per il settore aereo, al settore marittimo e istituisce un meccanismo separato (c.d. ETS 2) per il trasporto stradale. L'obiettivo è quello di ridurre le emissioni attraverso l'incremento del fattore di riduzione lineare delle emissioni e la progressiva eliminazione delle quote gratuite di emissione, per il trasporto aereo già dal 2026 mentre per i trasporti marittimi e stradali a partire dal 2027.
- **L'Alternative Fuel Infrastructure Regulation (AFIR) – 2023/1804** – fissa gli obiettivi di sviluppo per un'infrastruttura minima che sostenga l'adozione di carburanti alternativi in tutti i modi di trasporto e in tutti gli Stati membri dell'UE, in linea con gli obiettivi climatici dell'Unione; per assicurare la piena interoperabilità dell'infrastruttura e per fornire agli utenti informazioni complete e opzioni di pagamento adeguate presso le infrastrutture per i combustibili alternativi.

I regolamenti con diretto impatto sul trasporto stradale sono:

- **CO₂ emissions performance standards for new heavy duty vehicles (CO₂ HDV) – 2024/1610** – dispone che le emissioni medie di CO₂ della flotta UE di nuovi veicoli pesanti dovranno essere ridotte rispetto ai livelli del 2019 con i seguenti obiettivi: -15% per alcuni sottogruppi tra il 2025 e il 2029; -45% per tutti i veicoli non professionali dal 2030 al 2034; -65% per tutti i sottogruppi dal 2035 al 2039; -90% dal 2040 in poi. Per gli autobus urbani, i produttori dovranno garantire almeno il 90% di veicoli a zero emissioni dal 2030 al 2034 e il 100% a partire dal 2035.
- **CO₂ emissions performance standards for new light duty vehicles (CO₂ LDV) – 2023/851** – prevede che i produttori riducano progressivamente le emissioni di CO₂ dei nuovi veicoli rispetto ai livelli del 2021, di fatto mettendo al bando dal 2035 il motore termico: per le auto passeggeri, -15% entro il 2025, -55% entro il 2030 e -100% entro il 2035; per i veicoli commerciali leggeri, -15% nel 2025, -50% nel 2030 e -100% nel 2035, raggiungendo così l'obiettivo di emissioni zero. La Commissione Europea, tuttavia, ha recentemente aggiornato il suo Piano d'Azione per l'industria automobilistica (marzo 2025), introducendo nuove considerazioni sui carburanti alternativi. Sebbene l'obiettivo di eliminare la vendita di nuove auto a combustione interna entro il 2035 rimanga invariato, il piano prevede una maggiore apertura verso tecnologie alternative, inclusi i carburanti sintetici (e-fuels) e biologici (biofuels)¹.

¹ https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/it/qanda_25.



Per quanto riguarda il trasporto marittimo:

- **Il FuelEU Maritime – 2023/1805:** fissa limiti massimi per l'intensità media annua dei gas a effetto serra dell'energia utilizzata dalle navi di stazza lorda superiore a 5000 tonnellate che fanno scalo nei porti europei, indipendentemente dalla loro bandiera. Gli obiettivi garantiranno che l'intensità dei gas a effetto serra dei combustibili utilizzati nel settore diminuisca gradualmente nel tempo. Il valore di riferimento di 91,16 gCO₂eq/MJ dovrà essere progressivamente ridotto secondo questa traiettoria: -2% dal 2025, -6% dal 2030, -14,5% dal 2035, -31% dal 2040, -62% dal 2045 e -80% dal 2050, contribuendo così alla decarbonizzazione dei combustibili nel lungo termine. Gli obiettivi riguardano non solo le emissioni di CO₂, ma anche le emissioni di metano e protossido di azoto durante l'intero ciclo di vita dei combustibili utilizzati a bordo, su base Well-to-Wake (WtW).

Per il Trasporto Aereo:

- **Refuel EU Aviation – 2023/2405:** i fornitori di carburante per l'aviazione dovranno garantire una quota minima di Sustainable Aviation Fuel (SAF) disponibile per gli operatori aerei in tutti gli aeroporti UE, pari ad almeno: 2% dal 2025, 6% dal 2030, 20% dal 2035, 34% dal 2040, 42% dal 2045 e 70% dal 2050. Di queste percentuali, una quota minima dovrà essere costituita da carburanti sintetici: 1,2% dal 2030, 5% dal 2035, 10% dal 2040, 15% dal 2045 e 35% dal 2050. Fino al 2034 sarà possibile applicare le percentuali SAF come media ponderata sull'intero carburante fornito negli aeroporti UE. Gli operatori dovranno rifornirsi di almeno il 90% del carburante necessario annuale nello stesso aeroporto, salvo deroghe per motivi di sicurezza.

3.2 Nazionale

Per quanto riguarda la normativa nazionale² in merito alla decarbonizzazione del settore dei trasporti, i provvedimenti nazionali si allineano e recepiscono gli obiettivi Europei.

Per favorire l'applicazione di queste normative e incentivare la transizione energetica del settore, il governo italiano ha definito un **Piano Strategico Nazionale della mobilità Sostenibile** e attraverso il Piano Nazionale Integrato Energia Clima (PNIEC) ha espresso gli obiettivi al 2030 di riduzione delle emissioni e di penetrazione delle energie rinnovabili, che costituiscono una tappa intermedia verso il 2050. I fondi necessari per accelerare la transizione sono stati identificati in specifici capitoli di spesa del Piano Nazionale Ripresa Resilienza (PNRR) e con misure economiche come "l'ecobonus" con l'obiettivo di favorire la penetrazione di veicoli a basse emissioni.

² Una sintesi molto dettagliata dei provvedimenti e delle misure nazionali e comunitarie a fine 2024 è riportata nel documento seguente "La mobilità sostenibile" (Servizio Studi della Camera dei deputati).





4

Stato attuale

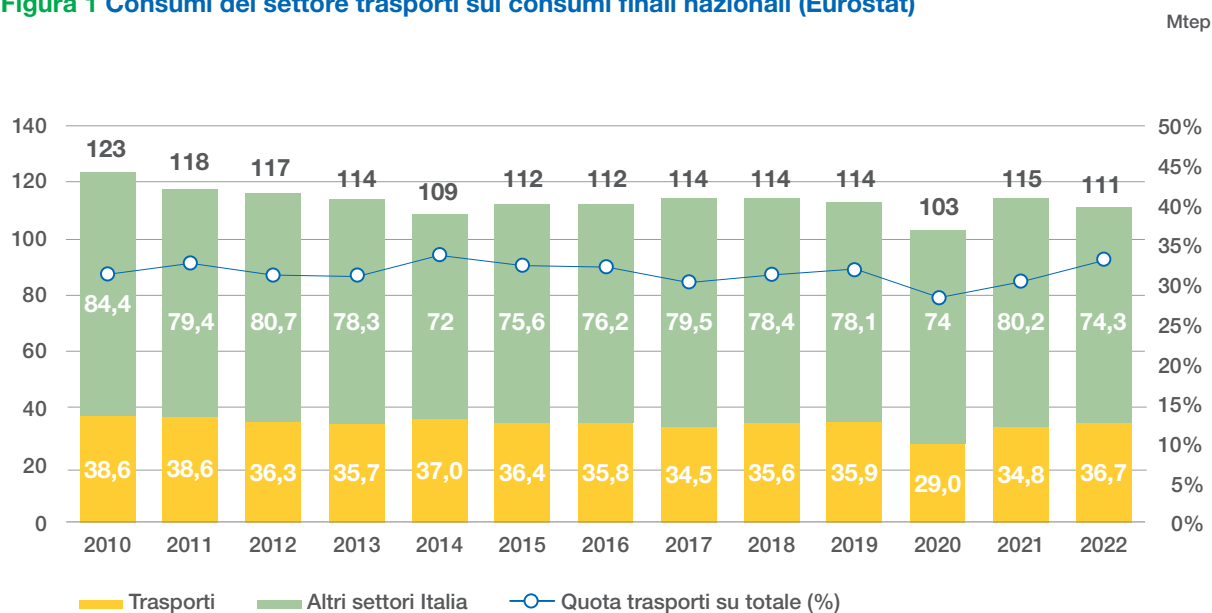


4. Stato attuale

4.1 Settore dei trasporti in Italia

I consumi del settore trasporti (Figura 1) rappresentano circa il 33% dei consumi finali. Tale percentuale è rimasta pressoché costante tra il 2010 e il 2022, fatta eccezione per il 2020 (come conseguenza della pandemia COVID). In termini assoluti tra il 2010 e il 2022 si è osservata una riduzione di circa 2 Mtep passando da 38,6 Mtep del 2010 a 36,7 Mtep del 2022.

Figura 1 Consumi del settore trasporti sui consumi finali nazionali (Eurostat)

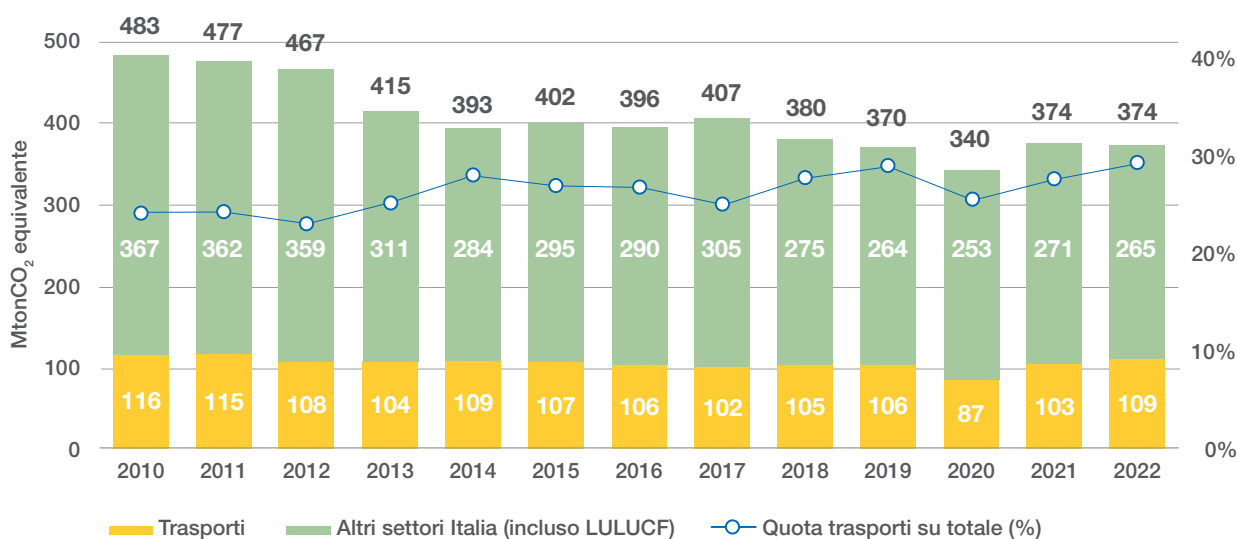




Dal punto di vista delle emissioni di gas serra (Figura 2), il settore dei trasporti è responsabile di oltre un quarto delle emissioni nazionali. Le emissioni del settore sono principalmente dovute al trasporto su strada che ne rappresenta circa il 90% mentre il restante 10% circa è associabile a trasporto su rotaia, aviazione e navigazione domestica e altre tipologie di trasporto³. Nel periodo tra il 2010 e il 2022 si osserva una progressiva riduzione delle emissioni, con un minimo nel 2020 (impattato dalla pandemia). In particolare, nel 2022 le emissioni del settore ammontano a 109 Mt, di cui circa 100 Mt CO₂ al trasporto su strada. Nello stesso periodo di osservazione, il peso percentuale sulle emissioni complessive è però significativamente aumentato, passando dal 24% del 2010 fino al 29% del 2022.

³ Trasporto via condotte e altro non specificato.

Figura 2 Quota emissioni settore trasporti sul totale nazionale (Eurostat)





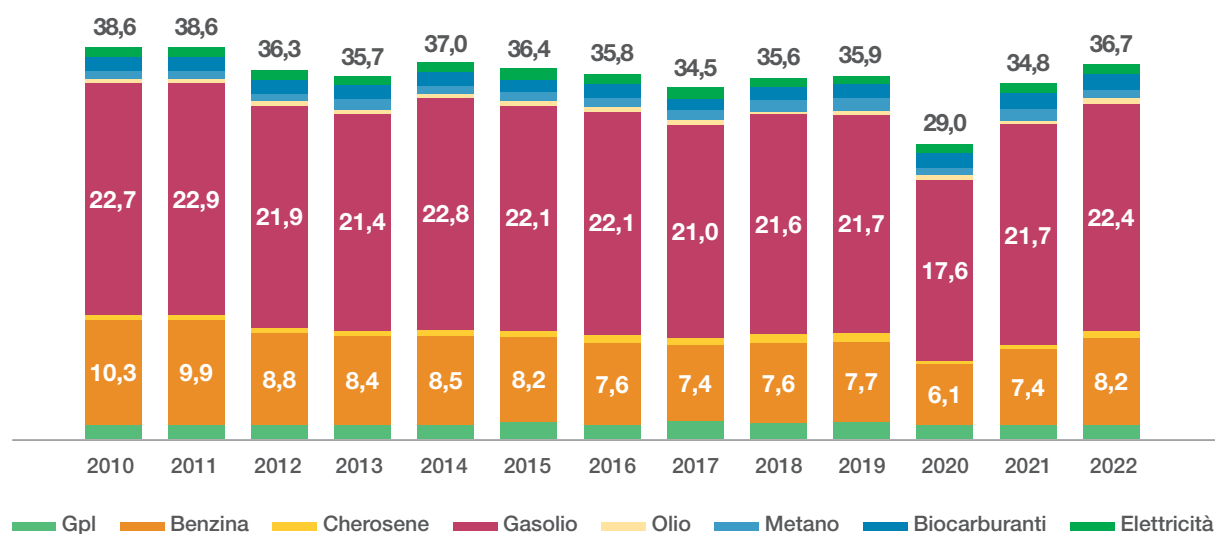
4.2 Consumi del settore trasporti

Il sistema dei trasporti ha dovuto, negli anni, rispondere a diverse sfide, tra cui la crescente domanda di mobilità, la necessità di modernizzare e mantenere le infrastrutture esistenti, e, da ultimo, l'urgenza di adottare soluzioni più sostenibili. In questo contesto, si è assistito a una crescente specializzazione di alcuni segmenti, come l'alta velocità ferroviaria, il trasporto aereo low-cost, i servizi di sharing mobility e la logistica integrata per le merci.

I consumi di gasolio si sono mantenuti costanti, al contrario di quelli legati alla benzina che hanno seguito un trend in riduzione fino al periodo 2015-2020 per poi registrare una progressiva ripresa, imputabile, probabilmente, all'affermazione delle ibride e benzina (Figura 3). Ci sono poi quote marginali di utilizzo di GPL (Gas Petrolio Liquefatto), biocarburanti, metano ed elettricità.

Figura 3 Consumi settore trasporti italiano escluso il trasporto internazionale (Eurostat)

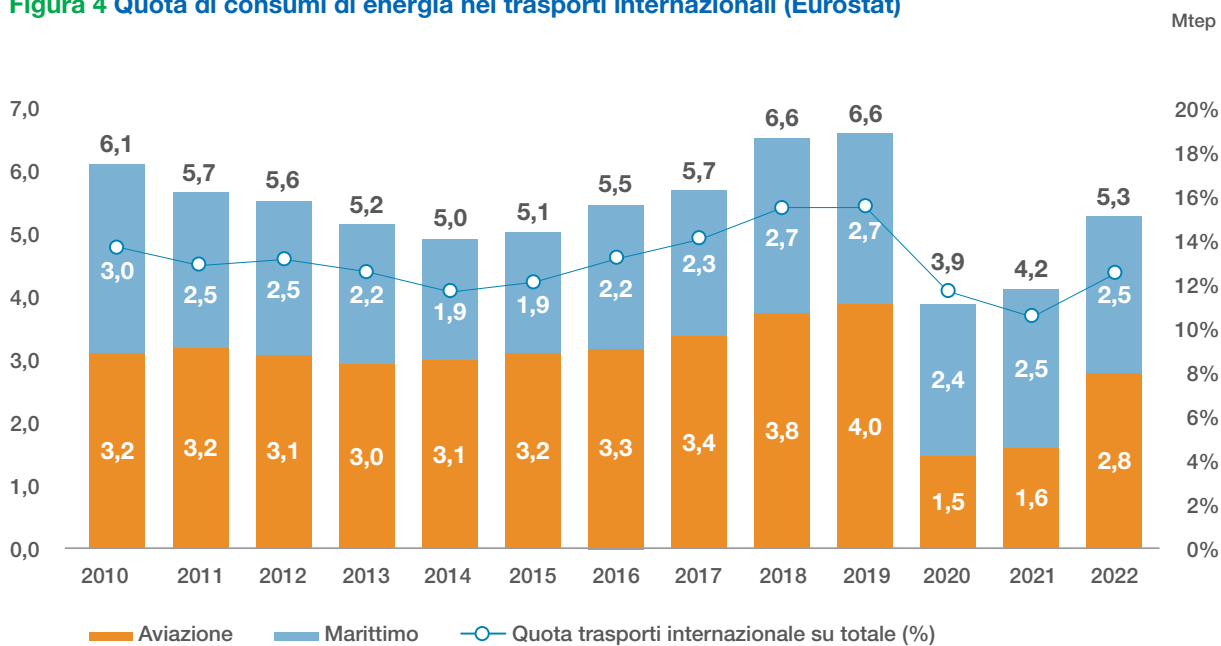
Mtep





Per quanto riguarda il trasporto internazionale (Figura 4), sia marittimo (olio combustibile e gasolio) che aviazione (cherosene per aviazione), si tratta di prodotti petroliferi il cui consumo medio dal 2010 è di circa 5 Mtep, rappresentando circa il 13% dei consumi complessivi del settore trasporti.

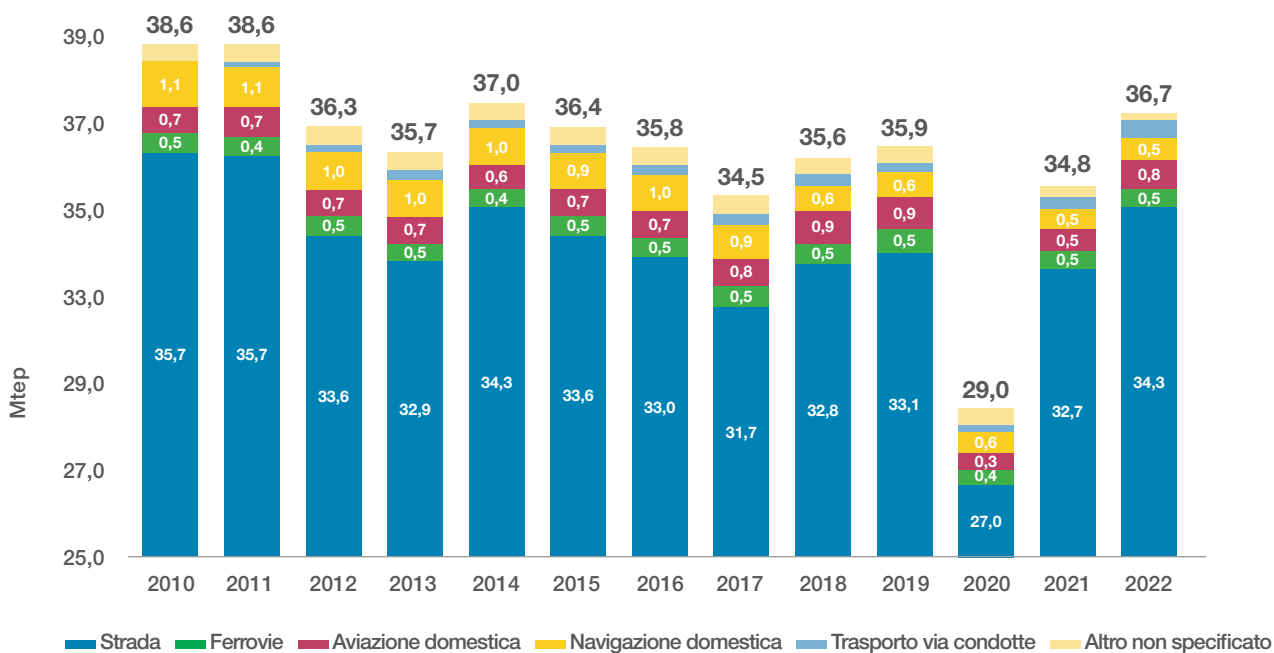
Figura 4 Quota di consumi di energia nei trasporti internazionali (Eurostat)





Per quanto riguarda la ripartizione nei diversi sottosettori, il trasporto su strada rappresenta la quota più consistente (Figura 5), circa il 93% dei consumi complessivi nazionali nel 2022, seguito, in ordine di consumo percentuale sul totale nazionale nel 2022, da aviazione domestica, navigazione domestica e trasporto su rotaia rispettivamente 2,2%, 1,4% e 1,3%. Dei 5,6 TWh (0,5 Mtep) consumati nel 2022 nel trasporto su rotaia, più di metà, il 57%, sono riconducibili a trasporto merci.

Figura 5 Consumi finali nei trasporti per sottosettore (Eurostat)

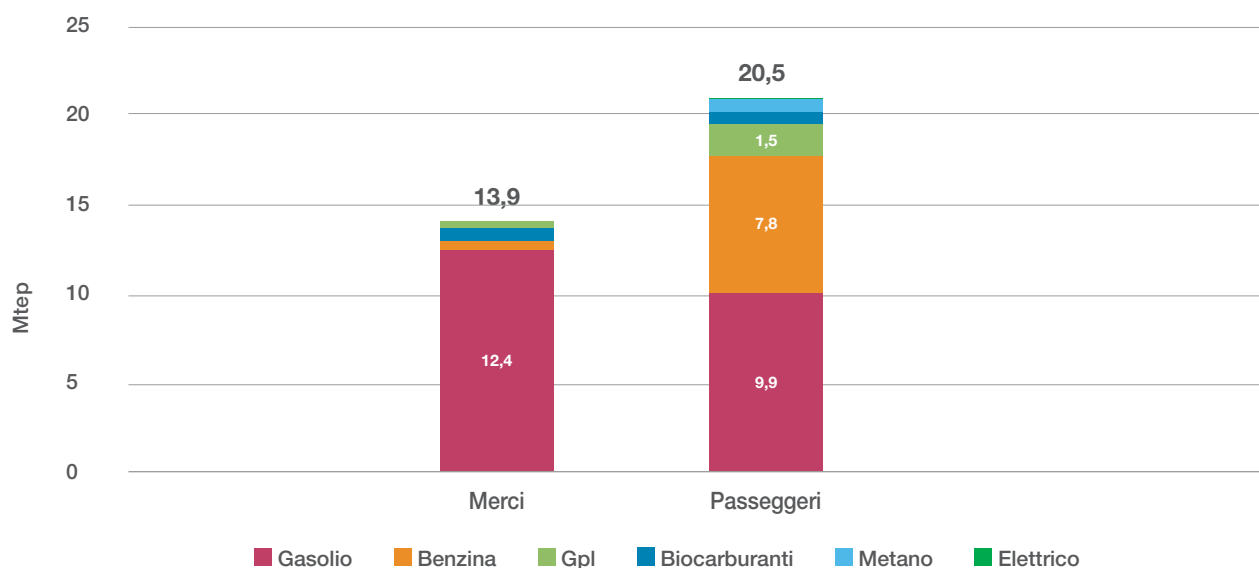




Il trasporto su strada comprende, a sua volta, il trasporto passeggeri e il trasporto merci. Al 2022 il trasporto passeggeri ha rappresentato circa il 60% dei consumi e delle emissioni del trasporto su strada nazionale. Il rimanente 40% è riconducibile al trasporto merci su gomma, di cui, più della metà è relativo al trasporto pesante.

I vettori di consumo prevalente risultano i prodotti petroliferi che coprono circa il 95% dei consumi, marginale è quindi l'utilizzo di biocarburanti e del vettore elettrico. Nel trasporto merci su strada il solo gasolio (escludendo la quota bio) copre circa il 90% dei consumi per trasporto merci su strada.

Figura 6 Consumi finali su strada passeggeri e merci anno 2022 (Eurostat)





4.3 Trasporto su strada in Italia

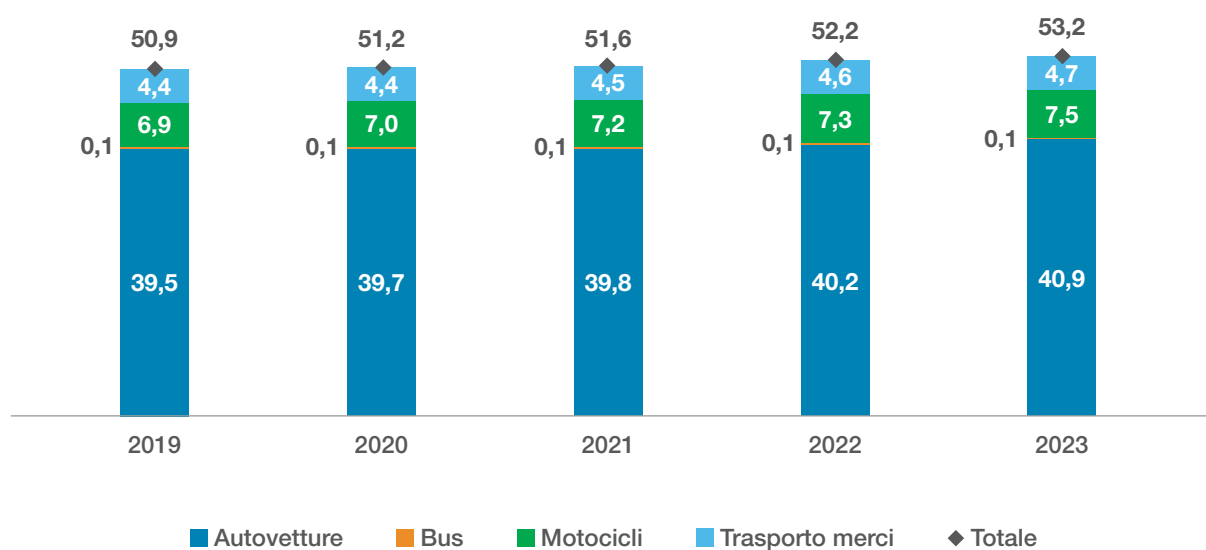
Come mostrato nel capitolo precedente, il trasporto su gomma è responsabile della maggior parte dei consumi dell'intero settore dei trasporti, nonché della quota maggiore di emissioni.

Il parco circolante italiano conta quasi 54 milioni di veicoli⁴ al 2023, in crescita rispetto al 2019, anno in cui i veicoli erano circa 51 milioni. Le autovetture rappresentano il 77% del totale, seguite dai motocicli (14%) e dai veicoli per trasporto merci (9%).

4 ACI Open Parco Veicoli – Rimangono esclusi dai totali mostrati gli autoveicoli speciali e specifici e tutti i rimorchi e semirimorchi.

5 Sono inclusi: autovetture, bus, motocicli, autocarri trasporto merci (AM) e trattori stradali (TS).

Figura 7 Parco circolante italiano⁵ (mln veicoli)





4.3.1 Trasporto passeggeri

Il trasporto passeggeri include le categorie delle autovetture, gli autobus e i motocicli. Come mostrato nel grafico precedente, le autovetture rappresentano la quota più rilevante in termini numerici, ma anche dal punto di vista delle emissioni, il trasporto privato su strada ha rappresentato, dal 2010 al 2022, circa il 65% delle emissioni totali del trasporto su strada e il 60% delle emissioni totali del settore trasporti.

Autovetture (AV)⁶

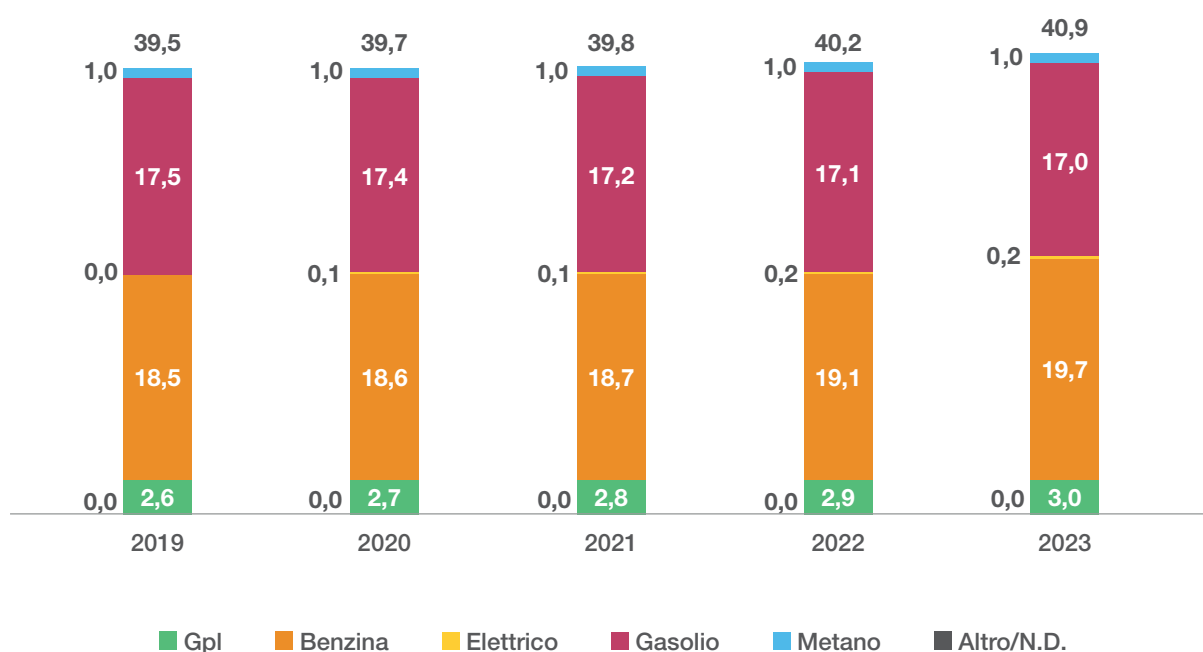
Dal 2019 al 2023 (Figura 8), il numero totale di autovetture in Italia è cresciuto costantemente, raggiungendo quasi 41 milioni di unità. Il parco circolante, a fine 2023⁷ risulta composto principalmente da auto a benzina e diesel per quasi l'85%; quote molto più modeste si registrano per le auto ibride (5,3%) e le auto a Gpl (6,5%). Le vetture elettriche e ibride plug-in coprono invece una quota di poco superiore all'1% (220.000 auto elettriche circolanti e 242.000 le ibride plug-in).

⁶ Considera veicoli destinati al trasporto di persone con un massimo di nove posti, incluso il conducente.

⁷ ACI Open Parco Veicoli.

Figura 8 Consistenza parco circolante autovetture per alimentazione

Auto (mln veicoli)





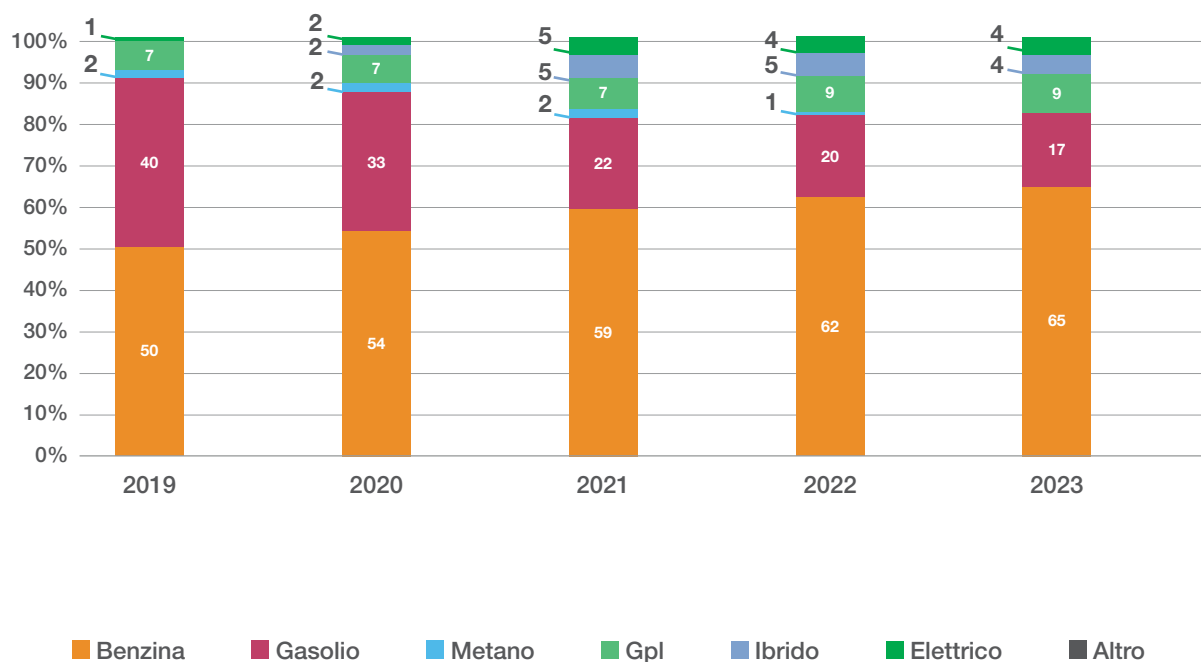
8 A mero titolo di esempio, con questo tasso di immatricolazioni annuali occorrerebbero circa 35 anni per arrivare ad una sostituzione completa dell'attuale parco circolante.

Le immatricolazioni annuali (Figura 9) in Italia si sono mantenute stabili nel periodo post Covid, intorno a 1,5 milioni di vetture immatricolate ogni anno⁸.

Più del 50% delle automobili immatricolate dal 2019 è a benzina, in quota crescente rispetto al gasolio, la cui quota percentuale si è ridotta progressivamente. Una tendenza in crescita si osserva per le auto elettriche che, insieme alle plug-in rappresentano il 7,5% dell'immatricolato nel 2024. Le autovetture alimentate a GPL hanno mantenuto, negli anni, una quota rilevante del mercato (circa 8-9%), mentre quelle a metano rappresentano una quota minimale e in decrescita delle nuove immatricolazioni.

Nonostante l'aumento significativo di autovetture più efficienti e sostenibili negli ultimi anni, il parco veicolare italiano rimane comunque molto vetusto, con circa il 59% dei veicoli aventi più di 10 anni e il 9% con più di 30 anni.

Figura 9 Nuove immatricolazioni (percentuali) per vettore



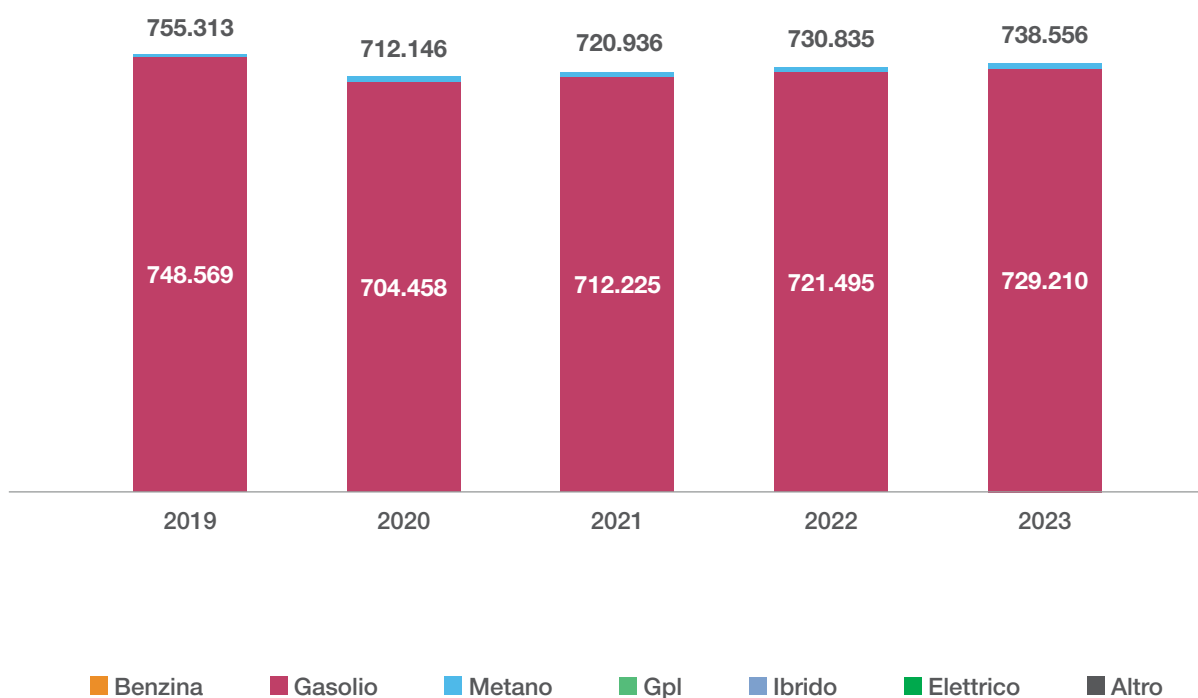


4.3.2 Trasporto merci

I veicoli per il trasporto merci comprendono varie categorie, i numeri sotto riportati fanno riferimento agli autocarri pesanti con portata oltre le 3,5 t e i trattori stradali per i quali verrà sviluppata un'analisi quantitativa sulle prospettive di evoluzione al 2050. Le emissioni associate al trasporto su strada nei mezzi pesanti rappresentano circa il 20% del totale delle emissioni del trasporto su strada in Italia.

I veicoli a gasolio rappresentano la quota principale del parco circolante (99%), tuttavia i dati relativi alle altre alimentazioni indicano i primi timidi segnali di transizione verso un parco di veicoli più ecologico. I veicoli elettrici sono passati da 47 nel 2020 a 122 nel 2023 e quelli a metano da 3.084 a 4.781 nello stesso arco temporale.

Figura 10 Consistenza parco circolante autocarri merci pesanti e trattori stradali per alimentazione





BOX DI APPROFONDIMENTO: le stime del 2024⁹

Nel 2024 il mercato automobilistico italiano ha registrato una generale flessione di circa lo 0,5 %, anche se non tutte le tipologie di veicoli si sono comportate allo stesso modo.

Nel 2024 le auto elettriche e ibride plug-in hanno coperto rispettivamente il 4,2% e il 3,3% delle nuove immatricolazioni, in leggera contrazione rispetto all'anno precedente. I veicoli ibridi (HEV) sono invece cresciuti di quattro punti percentuali rispetto all'anno precedente, raggiungendo il 40% del nuovo immatricolato. Le immatricolazioni di automobili a benzina sono rimaste sostanzialmente costanti, da 28,6% del 2023 a 29,2% del 2024, mentre il diesel ha registrato una riduzione marcata: da 17,5% nel 2023 a 13,8% nel 2024¹⁰.

I settori dei veicoli commerciali leggeri e pesanti nel 2024 si sono mantenuti in linea con l'anno precedente, con variazioni inferiori all'1%.

Il settore degli autobus, infine, ha registrato una forte crescita nel 2024, superiore al 25%, anche grazie agli investimenti pubblici per la mobilità sostenibile. La quota delle immatricolazioni di autobus elettrici sul totale dei mezzi immatricolati è cresciuta dal 8,6% del 2023 al 17,8% nel 2024; sono rimaste costanti quelle di autobus ibridi (HEV), attorno al 13%. In netto calo invece le immatricolazioni di autobus a diesel e in aumento quelle di veicoli alimentati con combustibili alternativi passate da 17,3% a 23,8%¹¹.

⁹ Fonte: ACEA "Press release car registrations – December 2024", ACEA "New commercial vehicle registrations – 2024", ACEA "New commercial vehicle registrations – 2024".

¹⁰ ACEA: New cars registration in 2024.

¹¹ Incluse le seguenti alimentazioni: fuel cell, metano, GPL, E85/etanolo e altri.





5

Evoluzione
del settore trasporti
al 2040



5. Evoluzione del settore trasporti al 2040

5.1 Il Documento di Descrizione degli Scenari 2024

Il Documento di Descrizione degli Scenari (nel seguito DDS 2024), pubblicato nel 2024, rappresenta il risultato delle attività svolte da Snam e Terna ai sensi delle delibere 654/2017/R/eel e 689/2017/R/gas. Il DDS 2024 contiene gli scenari energetici di riferimento propedeutici alla predisposizione dei Piani di Sviluppo (PdS) delle reti di trasmissione e di trasporto nei settori dell'energia elettrica e del gas naturale a livello nazionale.

In questo contesto Terna e Snam hanno sviluppato scenari per l'orizzonte temporale 2030 – 2040, in particolare il documento contiene:

- Scenari che raggiungono i target di *policy*:
 - al 2030 uno scenario PNIEC Policy (coerente con il PNIEC¹² pubblicato a giugno 2024)
 - al 2035 e al 2040 due scenari in linea con l'obiettivo net zero 2050 e con gli scenari elaborati a livello europeo dagli ENTSOs (ENTSO-E e ENTSG)¹³.
- Scenari contrastanti (elaborati al fine di valutare l'impatto delle infrastrutture pianificate su scenari differenti come richiesto dalla regolazione vigente):
 - al 2030, 2035 e 2040 uno scenario PNIEC Slow, rappresentativo di una transizione più lenta (rispetto agli scenari di policy) verso i target di decarbonizzazione.

¹²Piano Nazionale Integrato Energia e Clima (PNIEC) inviato dal MASE e dal MIT alla Commissione Europea il 30/06/2024, declinando a livello nazionale gli obiettivi dei pacchetti legislativi europei "Fit-for-55" e "RepowerEU".

¹³Relativamente agli scenari ENTSOs (European National Transmission System Operators) pubblicati a fine maggio in versione draft, sono state considerate le informazioni più aggiornate disponibili durante la realizzazione del presente DDS 2024.

Per quanto riguarda l'anno target 2040, il DDS 2024 ha elaborato due ipotesi di evoluzione del sistema energetico Distributed Energy Italia (DE-IT) e Global Ambition Italia (GA-IT) che sono coerenti alle storyline degli analoghi scenari elaborati a livello europeo dagli ENTSOs.

Maggiori informazioni e dettagli sono presenti all'interno del DDS 2024 disponibile sui siti di Snam e Terna. I seguenti paragrafi illustrano brevemente lo sviluppo del settore trasporti negli scenari contenuti nel DDS 2024, ovvero nell'orizzonte temporale 2030 – 2040, rappresentando un punto di partenza per l'evoluzione del settore nel decennio seguente.



BOX DI APPROFONDIMENTO: la domanda di mobilità

La domanda di mobilità è un aspetto cruciale per comprendere le dinamiche del settore trasporti e pianificare infrastrutture adeguate. È importante sottolineare che la domanda di mobilità viene generalmente suddivisa in trasporto passeggeri e trasporto merci. La prima si misura in miliardi di passeggeri-chilometro (Gpkm), mentre la seconda in miliardi di tonnellate-chilometro (Gtkm).

La misura pkm rappresenta il prodotto tra numero di passeggeri trasportati e la distanza percorsa. In altre parole, misura il totale dei chilometri percorsi da tutti i passeggeri su un determinato mezzo di trasporto. Ad esempio, se un treno trasporta 200 passeggeri per una distanza di 500 chilometri, la domanda di mobilità sarà di 100.000 pkm (200 passeggeri* 500 chilometri). Analogamente, la misura tonkm rappresenta il prodotto tra il peso delle merci trasportate (in tonnellate) e la distanza percorsa, misurando quindi il totale dei chilometri percorsi da tutte le tonnellate di merci su un determinato mezzo di trasporto. Ad esempio, se una nave cargo trasporta 5.000 tonnellate di merci per una distanza di 2.000 chilometri, la domanda di trasporto sarà di 10.000.000 tkm (5.000 tonnellate* 2.000 chilometri). Queste grandezze sono utili per valutare l'efficienza e l'utilizzo dei vari mezzi di trasporto, permettendo di confrontare la domanda tra diverse modalità. Analisi su possibili evoluzioni future di queste grandezze sono necessarie per pianificare infrastrutture e servizi adeguati, compreso lo sviluppo delle reti di trasporto dell'energia.



5.2 Trasporto passeggeri

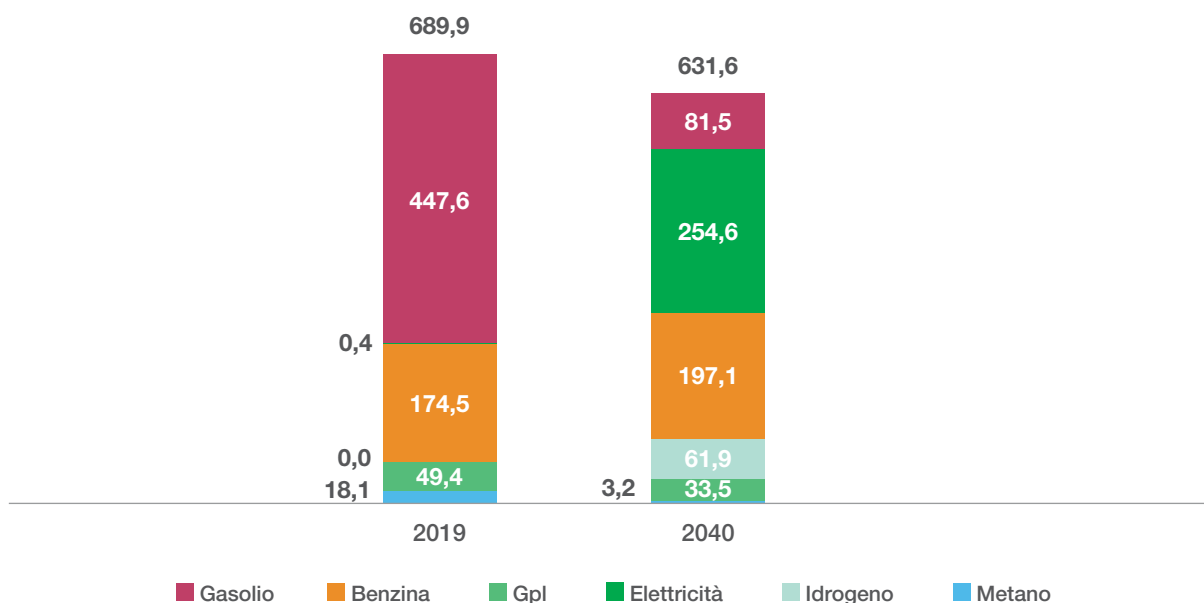
Negli scenari sviluppati da Snam e Terna e contenuti nel DDS 2024, la domanda di trasporto passeggeri è considerata pressoché stabile, con circa 951 Gpkm attesi per il 2040 rispetto ai 957 Gpkm del 2019. A fronte di una domanda pressoché stabile, gli scenari sviluppati ne considerano una diversa ripartizione tra le modalità di trasporto rispetto allo storico.

Gli scenari considerano una riduzione dell'utilizzo delle automobili private da circa 690 Gpkm (72%)¹⁴ nel 2019 a circa 631 Gpkm (66%) nel 2040. Analogamente, anche l'utilizzo di motocicli è ipotizzato in riduzione, pur mantenendo una quota simile all'attuale, intorno al 4%.

In termini di combustibili e vettori energetici utilizzati, il settore delle autovetture è sicuramente uno di quelli che vedrà maggiormente cambiare l'attuale mix, dominato da benzina e gasolio. Infatti, la quota coperta dal vettore elettrico dovrebbe crescere tra il 36% e il 44%, con circa 15-17 milioni di veicoli. Resterà comunque rilevante la quota di benzina, tra il 29% e il 34%, e di gasolio, che subirà la riduzione maggiore. Sia per i combustibili liquidi (gasolio e benzina) sia per i combustibili gassosi di origine fossile (metano e GPL), dovrebbe aumentare la quota di utilizzo di varianti di origine biologica o sintetica. Mentre la quota dei veicoli a GPL e metano, dovrebbe ridursi come risultato di un progressivo rinnovamento del parco circolante.

¹⁴Riferito alla domanda di trasporto passeggeri totale.

Figura 11 Trasporto passeggeri: domanda di mobilità (auto, Gpkm)





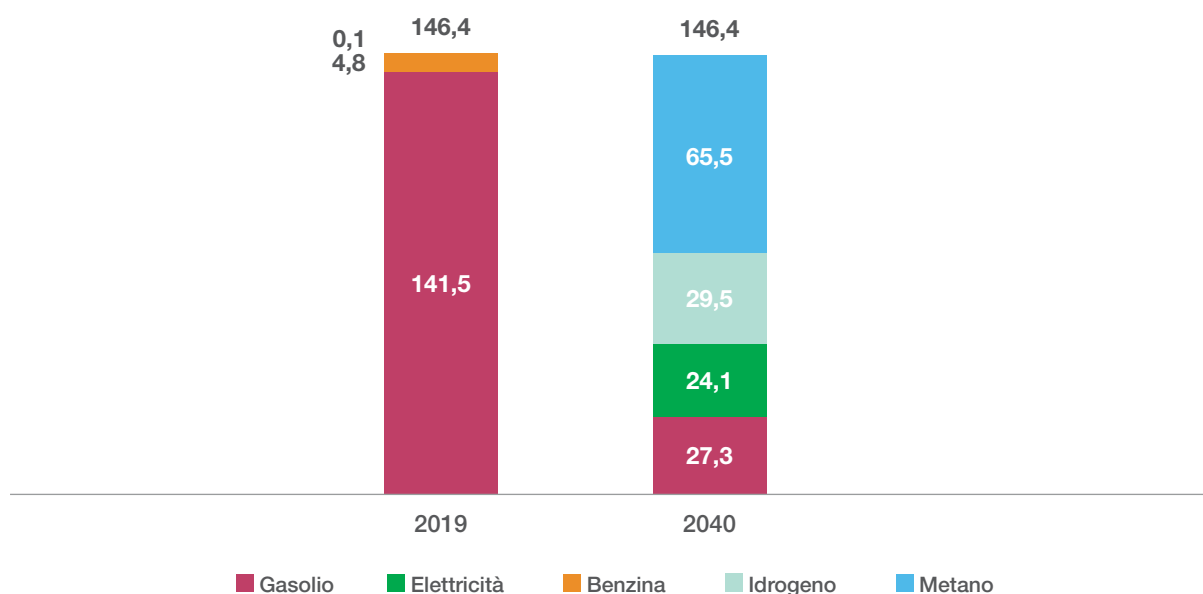
5.2.1 Trasporto merci

La domanda di trasporto merci (definito leggero se inferiore alle 3,5 t e pesante se superiore alle 3.5 t) è ipotizzata in aumento, passando da 503 Gpkm nel 2019 a 653 Gpkm nel 2040 accompagnata da un notevole cambiamento nella ripartizione tra le diverse modalità di trasporto; infatti, mentre il trasporto merci su van e camion al 2040 dovrebbe rimanere stabile a 146 Gpkm (valore di riferimento 2019), il trasporto ferroviario e il trasporto marittimo, nazionale e internazionale, dovrebbe aumentare, passando dal 72% di tutte le merci trasportate al 78%.

Per quanto riguarda i combustibili utilizzati nel trasporto merci su camion se nel 2019, il diesel dominava con il 97% di tutta la domanda settoriale, seguito da una piccola quota di benzina (3%), nel 2040, potrebbe scendere a una quota del 20% circa, sostituito da un aumento del vettore elettrico, del metano (sia di origine fossile che di origine biologica) e dell'idrogeno. Anche nel caso del trasporto merci gli scenari considerano la progressiva introduzione di combustibili alternativi di origine biologica o sintetica.

¹⁵ La quota metano al 2050 include gas naturale, biometano e metano sintetico.

Figura 12 Trasporto passeggeri: domanda di mobilità (van e camion, Gtonkm)¹⁵





6

Interazione
con referenti
di settore



6. Interazione con referenti di settore

Come anticipato nel capitolo iniziale, per elaborare la presente nota tecnica Snam e Terna hanno incontrato e intervistato un panel di esperti del settore provenienti da associazioni e istituzioni di riferimento. Nel caso specifico della presente nota, sono stati consultati:

- ANFIA
- UNRAE
- ASSOCOSTIERI
- CONFCOMMERCIO -TRASPORTI
- MOTUS-E
- NGV Italy
- Federmetano
- ANITA
- UNEM
- RSE
- ENEA

Quanto emerso dalle interviste e dai materiali resi disponibili dai soggetti indicati è stato poi analizzato e valutato da Snam e Terna ai fini della realizzazione della presente nota.

Tra gli elementi emersi con maggior chiarezza vi è innanzitutto la diffusa consapevolezza dell'incertezza che ancora caratterizza l'evoluzione della domanda di mobilità nei prossimi decenni. Più interlocutori hanno sottolineato come sia difficile, oggi, tracciare un quadro certo della ripartizione futura tra trasporto pubblico e privato, così come della preferenza tra le diverse modalità di trasporto – stradale, ferroviario, marittimo o aereo. Diversi referenti hanno posto l'attenzione sulla crescita di forme di mobilità alternativa e condivisa, come il noleggio a breve termine, i servizi di car sharing e la micromobilità elettrica, che stanno progressivamente modificando l'uso individuale del mezzo privato, soprattutto nelle aree urbane. A influire, nel futuro, saranno sia fattori culturali che dinamiche economiche, oltre alla capacità delle politiche pubbliche di indirizzare i comportamenti collettivi.



Una particolare attenzione è stata rivolta anche all'evoluzione della logistica delle imprese, che potrebbe seguire traiettorie molto diverse a seconda della disponibilità di infrastrutture e vettori alternativi.

Accanto al tema della domanda di mobilità, uno dei punti più ricorrenti nelle conversazioni ha riguardato il ruolo delle tecnologie e dei vettori energetici nella decarbonizzazione del settore. In questo contesto, è stato ribadito con forza il principio della neutralità tecnologica, ovvero la necessità di non limitarsi a una singola soluzione, ma di mantenere aperte più strade, in modo da rispondere in modo efficace alle esigenze specifiche dei diversi segmenti del trasporto.

Parte dei referenti interpellati ha affermato che l'elettrico rappresenta una delle leve principali per ridurre le emissioni CO₂, soprattutto per la mobilità leggera e urbana. La diffusione dei veicoli elettrici è già oggi in atto e la crescita attesa da qui al 2050 è significativa. Tuttavia, è stato sottolineato come l'elettrico da solo non sia sufficiente a coprire l'intero fabbisogno di mobilità, ad esempio nei contesti a maggiore percorrenza o nei trasporti pesanti, per il quale si può ricorrere all'uso dei biocarburanti, dell'idrogeno (per il quale occorre però accelerare la creazione di una filiera nazionale, sia dal punto di vista produttivo che infrastrutturale).

L'efficacia di tutte queste tecnologie, è stato osservato, dipenderà in larga misura dalla capacità di realizzare reti di ricarica e rifornimento capillari e accessibili, adeguate alle esigenze dei cittadini e degli operatori e, in ultima analisi, dalla loro capacità di offrire delle alternative alla mobilità convenzionale a costi sostenibili.

Anche nei comparti del trasporto ferroviario, marittimo e aereo è emerso un messaggio chiaro: le tecnologie esistono, ma devono essere accompagnate da scelte infrastrutturali coerenti e investimenti mirati. Carburanti come il Gas Naturale Liquefatto (GNL), il bio-GNL o l'idrogeno possono contribuire in modo importante alla decarbonizzazione del settore, ma richiedono pianificazione, supporto normativo e, in molti casi, un ripensamento degli assetti logistici.

In sintesi, il confronto con gli esperti ha restituito un quadro ricco e articolato, in cui l'orizzonte al 2050 viene percepito non tanto come un punto di arrivo già definito, quanto come un percorso da costruire con pragmatismo, pluralismo tecnologico e visione sistemica. La capacità del sistema-Paese di sostenere questa transizione dipenderà dalla coerenza tra politiche pubbliche, investimenti infrastrutturali e scelte industriali, ma anche – e forse soprattutto – dalla flessibilità nel saper cogliere le opportunità che emergeranno lungo il cammino.



7

Tecnologie chiave
per la decarbonizzazione
del settore



7. Tecnologie chiave per la decarbonizzazione del settore

Per ridurre significativamente le emissioni climalteranti del settore si rende necessario il ricorso e la disponibilità di una pluralità di tecnologie che siano in grado di rispondere alle esigenze operative dei diversi comparti: trasporto su strada, ferroviario, marittimo e aviazione.

In questo contesto, sono presenti soluzioni che sfruttano l'elettrificazione o che si basano sull'impiego di carburanti alternativi, sia di origine biologica (biofuel) che sintetica (e-fuel). Nel presente capitolo, oltre a richiamare il funzionamento delle specifiche tecnologie (eg: elettrificazione, fuel cell), vengono anche approfonditi gli adattamenti all'uso di carburanti alternativi necessari alle tecnologie esistenti (es.: motori a combustione interna). Lo scopo è dunque quello di presentare quali trasformazioni sono richieste a livello tecnologico per i comparti sopracitati e l'adattamento delle piattaforme esistenti all'impiego di nuovi vettori energetici per abilitarne la diffusione.

7.1 Trasporto su strada

Il trasporto su strada si presenta come un comparto complesso in cui la tipologia del veicolo (leggero o pesante) e la destinazione d'uso (trasporto di persone o di merci) rappresentano i driver principali per individuare le tecnologie chiave di lungo periodo.¹⁶ A oggi, le soluzioni più promettenti includono:

- veicoli Full Electric (BEV - Battery Electric Vehicle), alimentati da batterie ricaricabili.
- veicoli a celle a combustibile (FCEV - Fuel Cell Electric Vehicle), in particolare a idrogeno, soprattutto per trasporto pesante /o di lungo raggio.
- veicoli a combustione interna (ICE -Internal Combustion Engine) alimentati da combustibili alternativi come biocarburanti avanzati ed e-fuel, usati nei comparti della mobilità più difficili da elettrificare.

¹⁶ I veicoli leggeri comprendono principalmente automobili, motocicli e veicoli commerciali di piccole dimensioni, utilizzati per il trasporto privato o per consegne su brevi distanze. I veicoli pesanti, invece, includono autobus, pullman e mezzi destinati alla logistica e al trasporto su lunga distanza, come camion e autotreni.



7.1.1 Veicoli a batteria full electric (BEV)

Principio di funzionamento

Il principio di funzionamento dei veicoli elettrici a batteria (BEV) si basa sulla conversione dell'energia elettrica immagazzinata nelle batterie del veicolo in energia meccanica per la trazione del veicolo stesso. Questo avviene attraverso un motore elettrico, che sostituisce il motore a combustione interna presente nei veicoli tradizionali¹⁷).

La batteria di un veicolo elettrico immagazzina l'energia elettrica sotto forma di corrente continua (DC), d'altra parte, invece, il motore elettrico utilizza tipicamente energia sotto forma di corrente alternata (AC) che, alimentando gli avvolgimenti intorno allo statore del motore, crea un campo magnetico rotante che pone in rotazione il rotore del motore tramite delle correnti indotte su quest'ultimo. Ciò permette di convertire l'energia elettrica in energia meccanica, fornendo trazione al veicolo. Pertanto, tra i componenti principali presenti in un EV (Electric Vehicle) si ha anche un inverter di bordo che ha il compito di convertire l'energia elettrica (in DC) fornita dalla batteria in corrente alternata, così da poter alimentare il motore elettrico del veicolo. Inoltre, in molti veicoli elettrici è possibile recuperare energia elettrica durante la decelerazione tramite la frenata rigenerativa, che diminuisce mediamente i consumi dell'EV. In questi casi, il motore elettrico funge da generatore, trasformando l'energia cinetica del veicolo in energia elettrica per ricaricare la batteria.

Il funzionamento tecnico-operativo della mobilità elettrica pesante rispetto a quella leggera è analogo con differenze marginali che, tipicamente, riguardano alcuni componenti e/o processi, come ad esempio la presenza di più motori elettrici per garantire potenze di trazione più elevate, la presenza di batterie di peso e capacità energetica più alta (ca. 200-600 kWh contro i 30-100 kWh della mobilità leggera) o la più complicata gestione termica necessaria a controllare un'elettronica di potenza rilevante. Di maggior rilievo, invece, sono le differenze legate al processo di ricarica di un veicolo elettrico pesante che, a differenza di un veicolo leggero, utilizza quasi esclusivamente una ricarica in corrente continua (DC) per garantire tempi di ricarica compatibili con le esigenze operative della mobilità pesante.

La ricarica di un EV può infatti avvenire secondo 4 modalità, come definite dalla norma IEC 61851-1:

- *Modo 1* – prevede l'utilizzo di una presa di corrente standard che carica l'auto in AC a bassa potenza. Non è prevista alcuna comunicazione digitale tramite protocolli di comunicazione in tale modalità; pertanto, in Italia la ricarica Modo 1 è ammessa solo in contesti privati.
- *Modo 2* – la ricarica avviene utilizzando una presa di corrente domestica o industriale, ma viene introdotto un cavo di ricarica con un dispositivo di controllo per la gestione della ricarica tramite Pulse Width Modulation (PWM).
- *Modo 3* – la ricarica avviene utilizzando colonnine di ricarica (Electric Vehicle Supply Equipment: EVSE) pubbliche o private che erogano corrente alternata al veicolo. La potenza di ricarica massima di tali EVSE varia da 3,7 kW a 22 kW, consentendo una ricarica più rapida.
- *Modo 4* – la ricarica avviene utilizzando colonnine di ricarica che erogano corrente continua. La conversione di corrente AC/DC avviene direttamente all'interno dell'EVSE – provvista di inverter – e questo permette di raggiungere potenze di ricarica molto più elevate (es. 350 kW).

¹⁷ Internal Combustion Engine vehicles.



Trasporto leggero

Parametri tecnici

18 Silva, Avery, EPECentre, University of Canterbury – Electric vehicle supply equipment (EVSE) Charging efficiency evaluation, 2023.

19 Risultanze sperimentali progettualità Terna ESI e-Mobility <https://www.terna.it/it/sistema-elettrico/innovazione-gestione-sistema-elettrico/lucci-energy-system-innovation>.

20 Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure, fa riferimento ad una procedura di prova standardizzata per misurare i consumi di carburante e le emissioni dei veicoli leggeri.

21 Rigogiannis, Bogatsis, Pechlivanis, Kyritsis, Papanikolaou - Moving towards Greener Road Transportation: A Review, 2023.

22 Weiss, Winbush, Newman, Helmers – Energy consumption of electric vehicles in Europe, 2024.

23 Energy & Strategy, Politecnico di Milano – Smart Mobility, report 2024.

24 Cavalcante, Rodrigues da Silva, Zajc, Mendek, Calearo, Malkova, Ziras, Padiaditis, Michos, Mateus, Matias, Brito, Lekidis, Guzman, Nunes, Morais - Dataset on Electric Road Mobility: Historical and Evolution Scenarios until 2050, 2024.

25 Nguyen-Tien, Zhang, Strobl, et al - The closing longevity gap between battery electric vehicles and internal combustion vehicles in Great Britain, 2025.

I principali parametri tecnici che caratterizzano la tecnologia elettrica sono:

- **Efficienza di ricarica** – L'efficienza di ricarica di un EV dipende sia dalla modalità di ricarica utilizzata che dalla potenza a cui questa è effettuata. Prendendo a riferimento le ricariche Modo 3 e 4 (le più utilizzate in ottica prospettica), si ha un'efficienza di ricarica tipicamente compresa fra il 90% e il 95%, con alcuni modelli che arrivano anche al 99% di efficienza^{18,19}.
- **Efficienza di conversione per trazione** – L'efficienza di conversione per trazione di un veicolo elettrico è più opportunamente rappresentata dai consumi medi in termini di kWh/km. Prendendo a riferimento il ciclo WLTP²⁰ (procedura standard mondiale per il calcolo dei consumi di carburante), gli EV in Europa hanno a oggi un consumo medio di ca. 0,16-0,21 kWh/km per le autovetture^{21,22}, e ca. 0,24-0,26 kWh/km per i veicoli commerciali leggeri²³. In un'ottica previsionale con orizzonte 2050, si stima una generale riduzione dei consumi medi, con alcune stime più ottimistiche che vedono i consumi scendere anche al di sotto dei 0,15 kWh/km²⁴.
- **Vita utile** – Data la recente diffusione di EV leggeri, tale parametro tecnico è a oggi ancora oggetto d'analisi. Tuttavia, alcuni studi di recente pubblicazione suggeriscono una vita utile attesa maggiore di 18 anni²⁵.
- **Emissioni locali** – Le emissioni locali di un veicolo a batteria full-electric (BEV) sono nulle poiché non viene prodotta né CO₂ né altri gas clima-alteranti dalla conversione di energia elettrica in energia meccanica tramite il motore elettrico del veicolo stesso.



Vantaggi/svantaggi

- **Efficienza energetica** – L'efficienza di un veicolo elettrico, pur considerando le perdite di conversione legate al processo di ricarica che si attestano su valori di ca. 85-90%²⁶.
- **Emissioni locali** – Dato che l'energia meccanica utilizzata per la trazione di un EV non è legata ad alcun processo chimico di combustione, le emissioni locali di un veicolo elettrico leggero sono pressoché nulle (tank to wheel).
- **Supporto per le reti elettriche** – Un'adozione massiva di EV in grado di svolgere funzionalità di tipo Smart Charging e/o V2G (Vehicle to Grid, ovvero scambio energetico bidirezionale), potrebbe rappresentare un importante bacino di nuove risorse di flessibilità in grado di supportare le reti elettriche nazionali tramite l'asservimento a servizi ancillari nazionali globali e/o servizi di flessibilità sui nascenti mercati locali in gestione agli operatori delle reti di distribuzione.
- **Range d'utilizzo** – Sebbene l'autonomia dei recenti modelli di veicoli elettrici sia in aumento (ca.200-550 km¹¹), questa rimane a oggi ancora limitata. In un'ottica di lungo periodo con target 2050 occorre migliorare i range d'autonomia rendendoli pari o maggiori a quelli attualmente forniti da veicoli ad alimentazione tradizionale oggi in uso.
- **Tempi di ricarica** – Anche utilizzando infrastrutture di ricarica ad alta potenza (Modo 4), gli attuali tempi di ricarica di un veicolo elettrico sono sensibilmente maggiori di quelli necessari a un veicolo ad alimentazione tradizionale. A tendere è prevista una sensibile riduzione dei tempi di ricarica, grazie anche all'impiego di una rete di infrastrutture di ricarica a uso pubblico ad altissima potenza più capillare, con prodotti che verosimilmente raggiungeranno potenze fino a 600 kW-1MW.
- **Dipendenza da una rete di ricarica adeguata** – Un'adozione massiva di EV richiede una rete di infrastrutture di ricarica adeguatamente distribuita sul territorio in modo che possa soddisfarne le necessità di tutti gli utenti finali che utilizzano un veicolo elettrico. Sebbene recenti target siano stati indicati nel contesto europeo (cfr. Regolamento Europeo 2023/18041), molte città, così come anche zone rurali e/o periferiche, sono ancora sprovviste delle infrastrutture di ricarica necessarie.
- **Approvvigionamento delle batterie** – La crescente domanda di EV prevista per gli anni a seguire potrebbe portare a richieste elevate sia in termini di energia che di materie prime per la fabbricazione delle batterie automotive, esponendo al rischio di una potenziale dipendenza di fornitura da Paesi terzi esterni EU della filiera d'approvvigionamento per sopperire alla domanda^{27,28}.

²⁶<https://www.renaultgroup.com/en/magazine/energy-and-motorization/the-energy-efficiency-of-an-electric-car-motor>.

²⁷<https://rmis.jrc.ec.europa.eu/analysis-of-supply-chain-challenges-49b749>.

²⁸ Jacqueline Holman, EU battery industry must try avoid critical dependency on external sources: EC, 2022.



Limiti e prospettiva di sviluppo

Tra i principali fattori che influenzeranno l'evoluzione e la diffusione del vettore elettrico per il trasporto su strada leggero rientrano sicuramente le indicazioni derivanti dalle normative dai regolamenti europei, come chiarito nel Capitolo 3, che al momento sembrano favorire e supportare la penetrazione della mobilità elettrica nel trasporto leggero.

D'altra parte, stanti i vincoli regolatori, la crescita attesa della mobilità elettrica leggera potrebbe essere frenata negli anni a venire da potenziali rischi legati alla filiera d'approvvigionamento di materiali e componentistica base (come le batterie), essendo questa soggetta a influenze di natura geo-politica. Nonostante l'UE abbia avviato azioni atte a migliorare e garantire un approvvigionamento sicuro, diversificato e sostenibile delle materie prime critiche (cfr. Reg. EU 2024/1254²⁹), oggi la dipendenza da Paesi terzi è ancora forte.

Infine, di rilievo è anche il tema dei costi associati all'acquisto e utilizzo di un veicolo elettrico, attualmente ancora scarsamente competitivo rispetto alla controparte a combustione interna se non in limitati casi d'uso. Questo gap di convenienza è anche imputabile a una serie di componenti fiscali e parafiscali che pesano oggi sul vettore elettrico e ne penalizzano la convenienza rispetto alle alternative.

Pertanto, nonostante le indicazioni e prescrizioni di natura normativa e regolatoria, qualora il TCO (Total Cost Ownership) di un veicolo elettrico non dovesse ridursi apprezzabilmente – come atteso – rispetto ai veicoli ad alimentazione tradizionale, ciò costituirebbe una barriera allo sviluppo del vettore elettrico sul trasporto su strada leggero.

29 Regulation (EU) 2024/1252 of the European Parliament and of the Council of 11 April 2024 establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials and amending Regulations (EU) No 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724 and (EU) 2019/1020.



Trasporto pesante³⁰

Parametri Tecnici

- **Efficienza di ricarica** – L'efficienza di ricarica di un veicolo elettrico pesante dipende sia dalla modalità di ricarica utilizzata che dalla potenza a cui questa è effettuata. Le ricariche elettriche effettuate tramite infrastruttura di ricarica in DC ad alta potenza hanno tipicamente efficienze di carica contenute nel range 85%-95%, con picchi che raggiungono il 97% d'efficienza^{31,32} per alcuni caricatori. In ottica previsionale al 2050, appare ragionevole assumere un leggero miglioramento dell'efficienza di ricarica, che potrebbe attestarsi nell'intorno del range 90%-95% (incluse perdite nei cavi/connettori e inefficienze della batteria); Le ricariche tramite pantografo elettrico, invece, già oggi dichiarano efficienza di ricarica superiori al 95%³³.
- **Efficienza di conversione per trazione** – L'efficienza di conversione per trazione di un veicolo elettrico è più opportunamente rappresentata dai consumi medi in termini di kWh/km. Per quanto riguarda mezzi come i bus elettrici, l'efficienza di conversione varia sensibilmente in funzione del tipo di veicolo (p.es., articolati da 12 o 18 metri) e dal tipo di servizio che offrono (trasporto cittadino vs. intercity), con consumi che variano nel range 1,15 – 4,6 kWh/km a seconda dei casi^{34,35}. Anche per i mezzi come i truck elettrici, i consumi energetici variano sensibilmente in funzione dello stile di guida, dal tipo di veicolo e dal tipo di tratta analizzato (aree urbane vs. percorsi su autostrada). In generale, oggi i consumi variano tipicamente nel range 1,1 – 1,2 kWh/km per tratte in aree urbane e ca. 1,3 – 1,8 kWh/km per tratte in autostrada^{36,37,38}.
- **Vita utile** – Tale parametro dipende fortemente dal tipo di utilizzo (inteso in termini di km/anno) che viene assunto per il veicolo pesante analizzato. Pertanto, appare più significativo dare delle indicazioni di vita utile in termini di percorrenza chilometrica totale attesa, che oggi si aggira intorno ai range 400.000 – 1.500.000 km^{39,40}.
- **Emissioni locali** – Localmente, un veicolo a batteria full-electric (BEV) non genera emissioni poiché non vengono prodotti né CO₂ né altri gas climalteranti dalla conversione di energia elettrica in energia meccanica tramite il motore elettrico del veicolo stesso.

³⁰ Il trasporto pesante fa riferimento a mezzi superiori alle 3.5 t.

³¹ <https://press.siemens.com/it/it/comunicatostampa/siemens-lancia-una-delle-colonne-di-ricarica-dc-piu-efficienti-attualmente>.

³² <https://www.alpitronic.it/it/hypercharger/>.

³³ Al-Saadi, Mathes, Käsger, Robert, Mayrock, Mierlo, Bercebar - Optimization and Analysis of Electric Vehicle Operation with Fast-Charging Technologies, 2022.

³⁴ <https://www.sustainable-bus.com/news/electric-bus-consumption-energy-report-viriciti/>.

³⁵ Basma, Mansour, Haddad, Nemer, Stabat - Energy consumption and battery sizing for different types of electric bus service, 2021.

³⁶ <https://www.volvotrucks.it/it/news/press-releases/2022/jan/volvos-heavy-duty-electric-truck-is-put-to-the-test-excels-in-both-range-and-energy-efficiency.html>.

³⁷ Shaman, Yeh, Sprei, Plötz, Speth - Battery electric long-haul trucks in Europe: Public charging, energy, and power requirements, 2023.

³⁸ <https://www.mercedes-benz-trucks.com/it/it/trucks/eactros-600.html>.

³⁹ Zähringer, Schneider, Balke, Gamra, Klein, Lienkamp - Fast track to a million: A simulative case study on the influence of charging management on the lifetime of battery electric trucks, 2024.

⁴⁰ <https://www.sustainable-bus.com/news/catl-yutong-new-battery-commercial-vehicles-long-lifespan/>.



Vantaggi/svantaggi

L'adozione di un veicolo elettrico pesante presenta simili vantaggi a quanto già discusso per i veicoli leggeri. Fra questi rientrano:

- **Alta efficienza energetica.**
- **Emissioni locali nulle; Supporto alle reti elettriche**, sebbene l'asservimento a servizi di flessibilità nazionali globali e/o locale sia più limitato nei casi d'uso tipici della mobilità pesante, poiché avendo delle percorrenze medie molto maggiori rispetto al caso della mobilità leggera, è più vincolato dai lunghi tempi di ricarica.

Di contro, un veicolo elettrico pesante presenta:

- **Range d'utilizzo limitati** – Sebbene l'autonomia dei recenti modelli di veicoli elettrici pesanti sia in aumento (ca. 500-600 km^{41,42}), questa rimane a oggi ancora inferiore all'autonomia fornita da un veicolo ad alimentazione tradizionale, che arriva ad autonomie di anche 1.000 – 1.500 km. Tuttavia, in un'ottica previsionale con target 2050, i mezzi pesanti ad alimentazione elettrica potranno offrire range d'autonomia più o meno in linea a quelli attualmente forniti da veicoli ad alimentazione tradizionale.
- **Tempi di ricarica e complessità logistica** – Le maggiori capacità energetiche delle batterie utilizzate nei mezzi pesanti (200-600 kWh) tendono ad aumentarne i tempi richiesti per effettuare una piena ricarica del veicolo anche tramite infrastrutture di ricarica ad alta potenza. Inoltre, considerando le elevate percorrenze medie giornaliere, la gestione logistica dei tempi di ricarica richiede una pianificazione più attenta, ivi compresa la gestione delle soste e delle ricariche. Lo sviluppo al 2050 di una rete di infrastrutture di ricarica a uso pubblico ad altissima potenza più capillare, con prodotti che raggiungeranno potenze fino a 1 MW, favorirà una sensibile riduzione dei tempi di ricarica migliorandone la gestione logistica.
- **Approvvigionamento delle batterie** (come per i veicoli leggeri).

⁴¹ <https://www.mercedes-benz-trucks.com/it/it/trucks/eactros-600.html>.

⁴² <https://www.volvotrucks.com/en-en/news-stories/press-releases/2024/sep/breakthrough-volvo-to-launch-electric-truck-with-600-km-range.html>.



Limiti e prospettive di sviluppo del vettore elettrico

Premesso che come per i veicoli leggeri, anche per il trasporto pesante su strada le indicazioni derivanti dalle normative dai regolamenti europei potranno influenzare l'evoluzione e la diffusione del vettore elettrico, che al momento sembrano supportare i differenti vettori energetici che permettono di ridurre le emissioni di CO₂ del segmento dei trasporti pesanti. In generale, lo sviluppo del vettore elettrico per il trasporto pesante su strada è impattato sensibilmente dai differenti casi d'uso applicativi considerati.

In particolare, per la mobilità merci pesante, la riduzione dei tempi di ricarica e l'aumento dei range di percorrenza associate alle caratteristiche della mobilità pesante in Italia possono portare a un aumento della penetrazione del vettore elettrico soprattutto per i mezzi con peso <16t. A oggi, l'82% dei mezzi con peso tra le 6 e le 16 tonnellate ha percorrenze sotto i 150 km (93% se si considerano percorrenze sotto i 300 km). Per quanto riguarda i mezzi con peso maggiore di 16 tonnellate, il 46% dei mezzi ha percorrenze inferiori ai 150 km (62% se si considerano percorrenze di 300 km)⁴³.

Anche per quanto riguarda i bus elettrici, la riduzione dei tempi di ricarica, con la possibilità di impiego di ricariche tramite pantografo, e l'aumento delle autonomie dei veicoli li renderebbero ampiamente compatibili con le percorrenze medie dei bus urbani di circa 150-200 km⁴⁴.

Di rilievo per questa tipologia di veicoli resta il tema del TCO associato a un veicolo pesante, che, se non dovesse ridursi apprezzabilmente rispetto al costo associato a veicoli ad alimentazione tradizionale o alternative (es. biocombustibili), costituirebbe una barriera allo sviluppo del vettore elettrico sul trasporto pesante su strada.

⁴³https://www.motus-e.org/wp-content/uploads/2023/05/20230314_Motus-E_Report-IDR-MER-Cl_2023_ReportCompleto_v21D-1.pdf.

⁴⁴<https://www.autobusweb.com/wp-content/uploads/2021/04/SLIDE-ZANI-NI-GTT-Bus-elettrici-MZ-aprile-2021.pdf>.



7.1.2 Tecnologie per l'utilizzo di carburanti alternativi: veicoli a combustione interna (ICE) e Fuel Cell

Una ulteriore possibilità di decarbonizzazione del trasporto passeggeri e merci è rappresentato dall'utilizzo di combustibili alternativi. Le soluzioni tecnologiche dipendono dal tipo di carburante, nello specifico:

- per biocarburanti come il biodiesel, HVO (Hydrotreated Vegetable Oil), e bioetanolo si applicano le stesse tecnologie a oggi ascrivibili ai motori a combustione interna (ICE, Internal Combustion Engine) e quindi si rendono adatti per un loro uso nei veicoli esistenti sia per il trasporto leggero che in quello pesante (anche in motorizzazioni ibride);
- per biometano, sia nella forma gassosa compressa (bioCNG, Compressed-Natural-Gas) che liquida (bioLNG, Liquefied-Natural-Gas), esistono già soluzioni ad alta maturità tecnologica che si basano su motori ICE adattati all'uso del gas naturale. Tale carburante è adeguato in particolare per trasporti di media/lunga distanza sia di merci (van, camion) che persone (autobus interurbani);
- per l'idrogeno sono applicabili due tecnologie: le fuel cell e i motori ICE adattati all'uso di questa molecola. Tale opzione potrà trovare applicazione nel trasporto passeggeri e trasporto di merci a lunga distanza, sebbene non appaia a oggi un'opzione prioritaria (in termini di commercializzazione) nel caso dei veicoli leggeri su strada.

Il principio di funzionamento di un motore a combustione interna (ICE) è comunemente noto: si tratta di una macchina termica che converte l'energia chimica contenuta in un combustibile in energia meccanica all'interno di una camera di combustione, secondo due possibili cicli termodinamici:

- ciclo Otto (per motori a benzina e gas) con accensione per scintilla elettrica;
- ciclo Diesel (per motori a gasolio) con auto-accensione per compressione.

Diversamente, un veicolo a celle a combustibile (Fuel Cell Electric Vehicle – FCEV) è un veicolo che utilizza idrogeno come fonte di energia per generare elettricità a bordo, alimentando un motore elettrico. A differenza dei veicoli elettrici a batteria (BEV), che immagazzinano energia elettrica in accumulatori, i FCEV producono elettricità in tempo reale attraverso una reazione elettrochimica in cui idrogeno e ossigeno reagiscono rilasciando acqua, energia elettrica e calore. Tipicamente il serbatoio di idrogeno è ad alta pressione (generalmente tra i 350–700 bar) e immagazzina idrogeno in stato gassoso. Oltre al motore elettrico che trasforma l'energia elettrica in moto meccanico e a un sistema di regolazione del flusso energetico, nelle FCEV sono spesso presenti anche sistemi di accumulo per il recupero dell'energia in frenata e per la gestione della potenza.

7. Tecnologie chiave per la decarbonizzazione del settore



Di seguito in Tabella 1 una sintesi delle tecnologie per l'utilizzo di carburanti alternativi⁴⁵.

Tabella 1 Tecnologie idonee all'utilizzo di carburanti alternativi

Tecnologia	Motori termici tradizionali, ICE	Fuel Cell H ₂	ICE H ₂
Carburante	Applicati a biodiesel, HVO, bioetanolo e omologhi carburanti sintetici (e-fuels)	Biometano (bioCNG/LNG)	Idrogeno
Maturità tecnologia	Matura	Matura (CNG) Commerciale (LNG)	In sviluppo commerciale (limitata) Tecnologia prototipale, in sperimentazione
Rendimento	Bioetanolo: simile a benzina (30-35%); biodiesel, HVO: simile a gasolio (35-40%)	~25-35% 30-40% (nel caso dual-fuel)	~50-60% (Tank to Wheel) simile motori ICE a metano: ~30-38% (Tank to Wheel)
Infrastrutture	Rete di distribuzione già pronta	Può sfruttare infrastrutture trasporto/distribuzione gas naturale	Richiede un adeguato sviluppo del sistema di distribuzione dedicato
Autonomia	In linea con motorizzazione tradizionale	In linea con motorizzazione tradizionale	500-700 km A oggi intorno a 250 km (progetti recenti stimano fino a 600 km)
Emissioni locali ⁴⁶	NOx e PM ridotti, ma possibili aldeidi (in caso di incompleta combustione)	Emissioni dirette molto basse (limitate a NOx e PM).	Necessarie tecnologie di controllo per limitare emissioni NOx Possibili NOx dovuti all'alta temperatura di combustione

⁴⁵Enea: "The potential of E-fuels as future fuels", 2021

Mims, "Decarbonizzare i trasporti Evidenze scientifiche e proposte di policy", 2022

UNEM: pubblicazioni e relazioni annuali: <https://www.unem.it/pubblicazioni/>

IEA, The future of Hydrogen, Report (G20 Japan)

Publications Office of the European Union: Hydrogen Roadmap Europe: A Sustainable Pathway for the European Energy Transition.

⁴⁶Si richiamano qui i potenziali impatti legati alle sole emissioni associate a inquinanti locali. La CO₂ prodotta in fase di combustione (gas climalterante) nei motori ICE tradizionali essendo di origine biogenica ha impatti molto limitati in termini di emissioni nette in atmosfera.



Vincoli e opportunità

Le tecnologie associate ai combustibili alternativi si prestano a tutti i settori stradali, con specifici comparti in cui possono contribuire più o meno maggiormente in base alle caratteristiche tecniche dei veicoli, ai profili d'uso e alla maturità delle alternative elettriche.

Nel trasporto leggero, il bioetanolo può essere impiegato nei veicoli a benzina esistenti, mentre biodiesel e soprattutto HVO rappresentano una valida opzione per alimentare i motori diesel senza necessità di modifiche tecnologiche, grazie alla compatibilità drop-in. Il biometano costituisce una soluzione di decarbonizzazione del parco circolante a gas CNG, potendo sostituire il gas naturale di origine fossile; tuttavia, potrebbe avere un impatto marginale nel lungo termine per limitata diffusione di nuove immatricolazioni di auto a CNG. L'idrogeno, infine, rappresenta una soluzione percorribile, ma ancora costosa e con una riduzione di costi che si realizzerà solo nel lungo termine.

Per il trasporto pesante, in particolare per i mezzi con peso maggiore di 16t, i biocarburanti avanzati rappresentano un'opzione fondamentale per la decarbonizzazione. Il biometano, nella sua forma liquida (bio-LNG), è già oggi utilizzato in mezzi pesanti e può garantire buoni livelli di autonomia con un'impronta ambientale contenuta, rappresentando una soluzione credibile per i corridoi europei del trasporto sostenibile, incluso il trasporto collettivo di persone, come autobus extraurbani. L'idrogeno potrebbe nel lungo termine in questo comparto, grazie all'elevata densità energetica e ai tempi di rifornimento compatibili con le esigenze odierne del settore (ca. 3-5 minuti).

Si riporta di seguito una tabella di sintesi riguardante la possibile penetrazione nei comparti stradali delle tecnologie menzionate e vincoli alla loro diffusione.

**Tabella 2 Possibili settori di penetrazione delle tecnologie idonee all'utilizzo di carburanti alternativi**

Tipologia	Motori termici ICE/ ibridi per biodiesel, HVO, bioetanolo	Motori termici ICE/ ibridi asserviti al biometano	Fuel Cell H ₂	ICE H ₂
Comparto di potenziale interesse		Compresso (CNG): per trasporto leggero persone e merci e per flotte aziendali; Liquefatto (LNG): per trasporto pesante di lunga percorrenza sia persone (autobus interurbani) che merci (camion)	Soluzione esistente per trasporto passeggeri; progetti pilota per trasporto merci leggeri e pesanti	Sperimentazione su veicoli leggeri, test in altri settori
Vincoli alla diffusione	Penetrazione di mercato limitata dalla necessità di riservare quote di biocombustibile prioritariamente ad aviazione e navigazione, dove l'elettrificazione è meno praticabile	Competizione biometano per decarbonizzare settori industriali hard-to-abate LNG: la disponibilità di logistica di rifornimento dedicata. CNG: disponibilità di modelli a CNG	Alta complessità meccanica; richiesta di materie prime critiche (in particolare platino, metalli rari)	Complessità legata allo stoccaggio e alla gestione dell'H ₂ ad alta pressione Basso rendimento a causa della conversione energetica associata alla produzione dell'idrogeno e dal rendimento intrinseco della tecnologia ICE

Limiti e prospettive di sviluppo

Affinché soluzioni basate su biocarburanti, e-carburanti, biometano e idrogeno, possano penetrare significativamente nel trasporto su strada, è indispensabile un quadro normativo chiaro e orientato allo sviluppo, in grado di stimolare sia la realizzazione delle infrastrutture necessarie, sia la diffusione su larga scala di questi combustibili alternativi, a cui si deve associare una disponibilità di modelli adeguata a sostenerne la diffusione.

Prezzi competitivi rispetto ai combustibili tradizionali, filiere industriali stabili per feedstock avanzati, riconoscimento del valore ambientale nel calcolo del TCO, sviluppo e affidabilità delle infrastrutture e interoperabilità sono alcune delle leve che potrebbero favorire una maggior diffusione di questi veicoli. Permane come potenziale limite le misure introdotte in sede europea che prevedono il divieto di vendita di nuovi veicoli (auto e furgoni) con motore termico (ICE) alimentati da benzina, diesel, GPL o metano dal 1° gennaio 2035.



7.2 Trasporto marittimo

A livello tecnologico, il settore marittimo è fortemente influenzato da target via via più stringenti per emissioni gas inquinanti (NOx e SOx) e climalteranti (CO₂), il che rende necessario esplorare una pluralità di possibili soluzioni tecnologiche. Nella tabella sottostante vengono presentate le principali azioni che si stanno studiando suddivise per tre macrocategorie: adattamento delle tecnologie esistenti, sviluppo di nuovi sistemi propulsivi e implementazione di soluzioni digitali avanzate.

Tabella 3 Scouting soluzioni tecnologiche del settore marittimo

Adattamento motori combustione interna (ICE)	Sviluppo nuovi sistemi di propulsione	Implementazione soluzioni digitali
Retrofit della flotta esistente (dual-fuel e SOx scrubber)	Elettrificazione a batterie	Ottimizzazione dell'esercizio grazie al monitoraggio in tempo reale delle prestazioni
Applicazione combustibili alternativi (bio/e-fuels)	Fuel cell alimentate a H ₂ o ammoniacale	
Tecnologie post-combustione di cattura CO ₂ utilizzando combustibili tradizionali	Altre soluzioni: eg: propulsione ibrida, nucleare, propulsione eolica	Ottimizzazione delle rotte attraverso AI (Artificial intelligence) e IoT (Internet of Things), gestione ottimizzata dei carichi, etc



In prospettiva, per il trasporto marittimo si prevede prevalentemente l'utilizzo di una pluralità di biocarburanti, sia avanzati che di origine sintetica, con particolare attenzione a bioGNL, HVO (Hydrotreated Vegetable Oil), MGO (Marine Gasoil), metanolo, ammoniaca e idrogeno (maggiori dettagli nel box di approfondimento). Più in particolare⁴⁷:

- il **bioGNL** è già adatto per un suo utilizzo nelle navi a GNL, una tipologia di navi sta riscuotendo a oggi particolare interesse da parte degli armatori in termini di nuovi ordini;
- gli **HVO** e i **bio/e-MGO** sono compatibili con motori esistenti diesel e quindi non necessitano di particolari adattamenti tecnologici;
- il **bio/e-metanolo** nei motori a combustibile interna è compatibile, in retrofit, con i motori esistenti purché siano adottati alcuni accorgimenti tecnici al sistema di alimentazione oltre alla necessità di integrare scrubber post-combustione per ridurre gli NOx. Più specificatamente, gli adattamenti oltre a riguardare l'uso di materiali resistenti alla corrosione (come acciai inossidabili speciali o rivestimenti protettivi come la nichelatura) riguardano:
 - iniettori separati per assicurare una doppia alimentazione (metanolo + accensione pilota utilizzando (bio)diesel) e circuiti di raffreddamento per ridurre formazione di vapore intorno agli iniettori in quanto il metanolo evapora rapidamente;
 - serbatoi in acciaio inossidabile, con sistemi di inertizzazione per mantenere atmosfera inerte nei serbatoi e prevenire l'accensione dei vapori (essendo il metanolo infiammabile);
 - trattamento gas di scarico con catalizzatori per catturare formaldeide (CH_2O) e monossido di carbonio (CO) prodotti dalla combustione incompleta del metanolo, soprattutto a basse temperature;
- l'**ammoniaca** (verde) richiede modifiche tecniche e accorgimenti speciali al motore per renderla adatta come combustibile nei motori a combustione interna a causa delle particolari proprietà chimiche della molecola che ne richiedono una gestione attenta anche per tossicità e emissione NOx. In particolare, i sistemi di stoccaggio devono essere pressurizzati o raffreddati e progettati per impedire la fuoriuscita dell'ammoniaca. Inoltre, per abbattere NOx, devono essere installati sistemi per il post trattamento dei gas di scarico (scruber);
- l'**idrogeno** nei motori a combustione interna richiede alcuni adattamenti legati all'accensione, alimentazione, alla combustione ad alta temperatura (scrubber post trattamento) e la gestione dello stoccaggio. Per quanto riguarda il sistema di alimentazione:
 - iniettori specifici per H_2 (gassoso o liquido) con controllo ad alta precisione;
 - collettori di aspirazione devono essere modificati per evitare fenomeni di backfire (ritorno di fiamma);
 - valvole realizzate con materiali resistenti a usura e ignizione precoce.

Relativamente ai sistemi di stoccaggio, invece, i serbatoi devono essere pressurizzati per garantire stoccaggio ad alte pressioni (350–700 bar) se in forma gassosa o criogenici (a circa $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$) se liquido per evitare boil-off (evaporazione spontanea) dell'idrogeno.

⁴⁷ Energy Transition Outlook 2024, DNV. Maritime Forecast to 2050



Di seguito si riportano, in sintesi, le principali caratteristiche dei carburanti alternativi nel comparto marittimo⁴⁸.

Tabella 4 Principali caratteristiche dei carburanti alternativi nel comparto marittimo

	Tecnologia	Maturità tecnologica	Pro	Contro
<i>HVO, (bio, e-) MGO</i>	ICE (motore diesel)	Tecnologia matura e consolidata	Infrastrutture esistenti riutilizzabili	Emissioni di CO ₂ (con impatto climaterante in particolare quando non di origine biogenica) Emissione SOx tossici da trattare post-combustione
<i>bioLNG</i>	ICE, dual-fuel	In crescita, già in fase di commercializzazione	Limitate emissioni di CO ₂ Basse emissioni di NOx, SOx e PM Tecnologia disponibile	Methane slip (metano non combusto) Richiede infrastrutture criogeniche per lo stoccaggio in nave e bunkeraggio
<i>Metanolo</i>	ICE, dual-fuel, fuel cell (PEM ⁴⁹ , SOFC ⁵⁰)	In fase di adozione	Liquido a temperatura ambiente Riduce alcuni inquinanti	Bassa densità energetica Tossicità Richiede infrastrutture bunkeraggio
<i>NH3</i>	ICE modificato, fuel cell (SOFC)	In sviluppo	Possibilità adozione in motori ICE, fuel cell	Elevata tossicità e corrosività Tecnologie e infrastrutture in sviluppo
<i>Idrogeno</i>	Fuel cell (PEM, SOFC), turbine H ₂	Sperimentale	Possibilità adozione in motori ICE, fuel cell ad alta efficienza	Difficoltà stoccaggio Bassa densità volumetrica Infrastrutture trasporto da costruire

48 DNV, Energy Transition Outlook 2024: Maritime Forecast to 2050: A deep dive into shipping's decarbonization journey.

49 Proton Exchange Membrane fuel cell.

50 Solid Oxide Fuel Cell.



BOX DI APPROFONDIMENTO: evoluzione dei combustibili nel settore navale nel medio – lungo periodo

Il combustibile più utilizzato nelle navi è il HFO (Heavy Fuel Oil), noto anche come HSFO (High-Sulfur Fuel Oil). Con l'entrata in vigore della normativa IMO 2020, l'uso di tale combustibile è calato in favore di alternative con combustioni più pulite come il VLSFO (Very Low Sulfur Fuel Oil che ha una percentuale di zolfo $\leq 0,5\%$) e il MGO (Marine Gas Oil, gasolio marino non contenente residui pesanti). Per sopperire al cambio di combustibile, una soluzione adottata è l'installazione in loco sulle navi di scrubber in grado di usare HSFO rispettando i limiti sulle emissioni di zolfo.

Accanto alle soluzioni esistenti, inizia ad affermarsi la motorizzazione dual-fuel, un sistema in grado di utilizzare una combinazione di due combustibili diversi: al gasolio marino viene associato un secondo combustibile (eg: gas naturale liquefatto o metanolo) riducendo emissioni gas inquinanti (NOX e SOX) e climalteranti (CO_2) rispetto all'uso del solo gasolio. Per limitare le emissioni di CO_2 , si stanno esplorando anche sistemi di cattura post-combustione per immagazzinare, in forma liquefatta, temporaneamente la CO_2 emessa allo scarico a bordo nave (OCC, on board carbon capture).

Nel medio termine il GNL si candida come principale combustibile grazie alla minore intensità carbonica sebbene questo richieda investimenti infrastrutturali per il deposito, stoccaggio e rifornimento nei porti di questo combustibile. Oltre la metà degli ordini globali di nuove navi prevede infatti l'utilizzo del GNL come mono-fuel. Accanto al GNL, un altro combustibile che sta prendendo piede è il metanolo. I principali vantaggi nell'impiego del metanolo sono molteplici: la facilità di stoccaggio, essendo un combustibile liquido a temperatura ambiente, l'essere una molecola sicura e tecnologicamente già testata e il fatto di avvalersi della maturità della tecnologia dei motori a combustione interna e di infrastrutture esistenti. Tuttavia, la moderata densità di energia, il basso punto di infiammabilità e la tossicità del metanolo sono elementi a svantaggio di questo combustibile.

Più limitato lo sviluppo di soluzioni che prevedono l'utilizzo come combustibile di idrogeno o di ammoniaca per i costi ancora elevati.



8

Prospettive di sviluppo
al 2050



8. Prospettive di sviluppo al 2050

Il settore dei trasporti rappresenta una quota significativa sia dei consumi finali nazionali sia delle emissioni climalteranti (circa il 30%). L'evoluzione verso un sistema più efficiente e meno inquinante è pertanto imprescindibile per raggiungere gli obiettivi di decarbonizzazione definiti a livello Europeo e Nazionale.

Tuttavia, il percorso verso il raggiungimento di questi obiettivi presenta diversi aspetti critici, in particolare: il coinvolgimento di tutti i possessori di mezzi di trasporto, un numero di soggetti estremamente elevato, tempi non trascurabili per il turnover della flotta e la mancanza, almeno a oggi, di una chiara visione su quali saranno le tecnologie "vincenti" in ciascun caso d'uso.

8.1. Prospettive di evoluzione della mobilità su gomma

Come illustrato nei capitoli precedenti, il trasporto su gomma rappresenta la quota più elevata in termini di consumi finali e di emissioni dell'intero settore dei trasporti italiano, nonché il principale destinatario di una serie di misure volte a ridurre o indirizzare una progressiva sostituzione tecnologica degli attuali motori a combustione interna.

Il trasporto su gomma include il trasporto passeggeri e il trasporto merci, il primo dei quali può ulteriormente essere segmentato in trasporto pubblico (autobus e pullman) e trasporto privato (autoveicoli e motocicli).

8.1.1. Mobilità pubblica

La decarbonizzazione del trasporto pubblico è sostenuta e incoraggiata da una serie di politiche incentivanti e normative (europee e nazionali) che mirano da una parte a favorire l'ammodernamento delle flotte e l'utilizzo di mezzi e combustibili meno inquinanti e dall'altra al potenziamento dell'offerta di trasporto pubblico ai cittadini, soprattutto nelle città, per offrire una valida alternativa all'utilizzo dei mezzi privati. Dal 2019, in Italia, è stata emanata una serie di misure legislative e schemi di finanziamento con l'obiettivo di ridurre l'età media degli autobus (particolarmente elevata in Italia), rinnovando il parco esistente con mezzi a basse emissioni.



Dal punto di vista tecnologico c'è una serie di alternative che permettono la riduzione e l'azzeramento delle emissioni climalteranti tra cui: la sostituzione di mezzi particolarmente vetusti, l'utilizzo di carburanti alternativi come CNG e biocarburanti, in grado di ridurre le emissioni rispetto ai tradizionali autobus alimentati con combustibili fossili, e l'introduzione di nuove tecnologie, tra cui gli autobus elettrici e gli autobus a idrogeno.

Gli autobus elettrici rappresentano una valida alternativa nel trasporto cittadino: l'ammodernamento delle flotte in corso nelle grandi città come Milano e Roma, che prevede l'adozione di un numero sempre maggiore di mezzi elettrici, costituisce un valido esempio di come questa tecnologia si adatti al ciclo di utilizzo cittadino che prevede percorsi e tempi prestabiliti compatibili con l'effettuazione di ricariche notturne o nei momenti di non utilizzo in deposito.

Gli autobus a idrogeno, così come delineato anche nella Strategia Nazione dell'idrogeno, trovano applicazione nell'ambito del trasporto pubblico extraurbano per via delle maggiori percorrenze oppure in contesti caratterizzati da un ecosistema sviluppato per tale vettore quali le Hydrogen Valleys.

8.1.2 Mobilità privata e trasporto merci

La mobilità privata e il trasporto merci su gomma sono i due sottosettori che più incidono sui consumi del settore trasporti. L'evoluzione di questi sottosettori verso sistemi più sostenibili risulta essere imprescindibile per raggiungere gli obiettivi di lungo termine, ma rimane soggetta a una serie di variabili che ne rendono alquanto sfidante ogni cambiamento.

Gli attori coinvolti sono molteplici: dai singoli cittadini che devono cambiare un'automobile alle aziende che devono dotarsi di una flotta aziendale o di mezzi per il trasporto merci. La resistenza al cambiamento, la disponibilità tecnologica, i costi di acquisto e gestione, le normative in evoluzione sono solo alcuni degli elementi da tenere in considerazione quando si affronta il tema del rinnovamento del parco circolante.

Per quanto riguarda il parco auto, l'Italia è uno dei Paesi europei con il più alto numero di automobili circolanti e nel quale le automobili sono più vecchie, di conseguenza meno efficienti e con consumi ed emissioni più elevate. Al contempo, l'Italia è un Paese in cui l'utilizzo dell'automobile è estremamente diffuso e, in alcuni casi, necessario anche per gli spostamenti quotidiani.

Di seguito è proposta un'analisi semplificata dell'evoluzione del parco circolante italiano che si basa sull'evoluzione dei Total Cost of Ownership (TCO) delle diverse tecnologie per quanto riguarda la mobilità privata dei passeggeri (automobili) e il trasporto merci pesante. L'obiettivo è quello di illustrare in via qualitativa la complessità del tema e le criticità associate evidenziando gli elementi che possono avere impatto sulle scelte degli utenti e, di conseguenza, sull'evoluzione del sistema nazionale dei trasporti.



Metodologia e riferimenti adottati

Per analizzare la possibile evoluzione del parco circolante italiano è stata sviluppata un'analisi che si basa sull'evoluzione del Total Cost of Ownership (TCO) delle diverse tecnologie disponibili. Il TCO offre, infatti, una misura di confronto tra le opzioni tecnologiche disponibili che tiene conto del costo iniziale e di tutti i costi di mantenimento e utilizzo nel ciclo di vita di un bene.

Tuttavia, è importante ricordare le limitazioni associate all'utilizzo di un approccio basato sui TCO che risentono notevolmente delle incertezze legate ai parametri utilizzati per il calcolo.

Nel caso del trasporto su gomma ci sono una serie di elementi che possono avere un impatto non trascurabile sui parametri utilizzati, come: l'evoluzione del prezzo dei combustibili, sia di quelli tradizionali che di quelli alternativi (di origine biologica o sintetica), la loro effettiva disponibilità in ottica 2050, l'evoluzione del costo delle batterie e delle intrinseche caratteristiche tecniche che possono essere soggette a elevata variabilità o il mantenimento di un regime incentivante per alcune tipologie di veicoli. Sono tutti elementi che aumentano considerevolmente l'incertezza del calcolo del Total Cost Of Ownership.

Come specificato, il TCO considera sia il costo iniziale (capex) che i costi operativi (opex), risentendo della variabilità di entrambe queste due componenti.

Negli ultimi anni, per quanto riguarda le automobili, si è assistito a un continuo aumento dei prezzi dei veicoli causato da diversi fattori tra cui la continua integrazione di sistemi avanzati di assistenza alla guida, di infotainment e motori più efficienti integrati nelle autovetture di base; l'aumento dei prezzi delle materie prime, la recente crisi dei semiconduttori a seguito della pandemia di Covid-19, normative sempre più stringenti che richiedono tecnologie più sofisticate sono tutti elementi che hanno contribuito a un costante aumento dei prezzi di base delle autovetture.

L'utilizzo dell'automobile in termini di kilometraggio annuale è un ulteriore elemento che, oltre a essere di difficile previsione in ottica 2050, ha impatti notevoli sul TCO: passare da una percorrenza di 7.000 km/anno a una di 11.000 km/anno con un'autovettura elettrica risulta in una variazione del 20% sul valore finale del TCO.

Insieme a questi elementi di carattere economico, c'è poi una serie di fattori di carattere sociale che possono influenzare l'evoluzione del trasporto privato su gomma legati alle scelte e alle preferenze di ogni singolo cittadino, difficilmente quantificabili e prevedibili in un'ottica di così lungo periodo. Il considerevole differenziale di costo tra un'autovettura con motore a combustione interna e una elettrica è solo una delle barriere a uno sviluppo più sostenuto di veicoli meno inquinanti; altri elementi che spesso vengono individuati come barriere sono l'autonomia che tali veicoli possono garantire e la difficoltà della ricarica legata alla diffusione delle colonnine di ricarica o alla possibilità di effettuare ricarica domestica.



Alla luce di quanto fin qui evidenziato, le grandezze presentate nelle sezioni successive devono essere interpretate come illustrative della variabilità a cui è soggetta la transizione del settore trasporto su gomma al variare dei numerosi parametri fin qui discussi.

L'analisi dell'evoluzione del parco circolante delle autovetture e dei mezzi per il trasporto pesante è stata sviluppata in due step:

- 1) calcolo dell'evoluzione dei TCO dal 2025 al 2050;
- 2) utilizzo dell'evoluzione dei TCO per determinare l'evoluzione del parco circolante esistente attraverso lo sviluppo di un modello di diffusione.

Gli step sopra definiti sono stati sviluppati per diversi scenari che considerano la variabilità della normativa e la variabilità dell'evoluzione del prezzo delle commodities:

- Un primo scenario considera l'implementazione, così come da normativa attuale, dello stop alle immatricolazioni di veicoli con motore endotermico dal 2035, restringendo quindi il numero di tecnologie che possono essere commercializzate in seguito a questa data.
- Un secondo scenario, contrastante, ipotizza un rilassamento di tale vincolo, consentendo la vendita di mezzi di trasporto con motore endotermico anche dopo il 2035; per questo scenario in cui non vi è alcuna restrizione sulle tecnologie che possono competere dopo tale data sono state sviluppate due ulteriori sensitivity, oltre al caso base, che analizzano l'effetto di un aumento o di una diminuzione (+/- 20%) del prezzo dei combustibili rispetto al prezzo di elettricità e idrogeno (che rimangono fissi).

La tabella sottostante offre uno schema riepilogativo degli scenari utilizzati nell'analisi.

Tabella 5 Riepilogo scenari analizzati

		Scenari di commodities		
		Basso	Medio	Alto
Scenari di normativa	STOP immatricolazioni motori endotermici al 2035			
	Senza STOP immatricolazioni motori endotermici al 2035			

Nel caso dello scenario con normativa attuale che include, quindi, lo stop dei motori endotermici dal 2035, è stato considerato un solo set di prezzi delle commodities in quanto la restrizione applicata sulle tecnologie disponibili dopo tale data rende superflue le ipotesi sulla relatività dei prezzi dei vettori tradizionali rispetto all'elettrico o all'idrogeno.



Per quanto riguarda invece gli scenari che ipotizzano un rilassamento del vincolo normativo riguardo le immatricolazioni dei motori endotermici sono stati considerati diversi scenari dei prezzi delle commodities:

- uno scenario Medio che fa riferimento all'evoluzione ipotizzata nel DDS 2024;
- uno scenario Basso in cui il prezzo dei combustibili tradizionali fossili, biologici o sintetici è più basso dello scenario Medio, a parità di prezzo del vettore elettrico e dell'idrogeno;
- uno scenario Alto in cui il prezzo dei combustibili tradizionali fossili, biologici o sintetici è più alto dello scenario Medio, a parità di prezzo del vettore elettrico e dell'idrogeno.

La relatività dei prezzi dei principali vettori utilizzati nello scenario Medio è sintetizzata nella seguente tabella, che riporta il rapporto tra il prezzo del vettore e il prezzo della benzina⁵¹. I range rappresentano le differenze tra prezzi per la mobilità privata e quella delle merci.

Tabella 6 Prezzi dei vettori

Rapporto rispetto al prezzo della benzina			
Vettore	Basso	Medio	Alto
Diesel	0,7 – 0,9	0,7 – 0,9	0,7 – 0,9
GPL	0,5	0,5	0,5
Metano	0,4 – 0,5	0,4 – 0,5	0,4 – 0,5
Idrogeno	0,8	0,6	0,5
Elettricità	0,6 – 1,1	0,4 – 0,9	0,4 – 0,7

Gli output del parco circolante negli scenari sopra descritti vengono poi utilizzati per elaborare una possibile evoluzione, seppur illustrativa, dei consumi finali del settore trasporti su gomma al 2050.

I principali input utilizzati per l'analisi dei TCO e dell'evoluzione del parco circolante sopra illustrata sono:

- *capex riferiti ai costi di acquisto delle varie tipologie di automobili o mezzi pesanti considerati;*
- *opex riferiti ai costi di mantenimento annuali;*
- *dati tecnici relativi a efficienze ed emissioni;*
- *percorrenze medie in termini di kilometraggio annuale;*
- *costi dei combustibili;*
- *consistenza del parco circolante al 2023*
- *tassi di ricambio dei veicoli.*

⁵¹ I rapporti sono calcolati sul prezzo espresso in EUR/kWh.



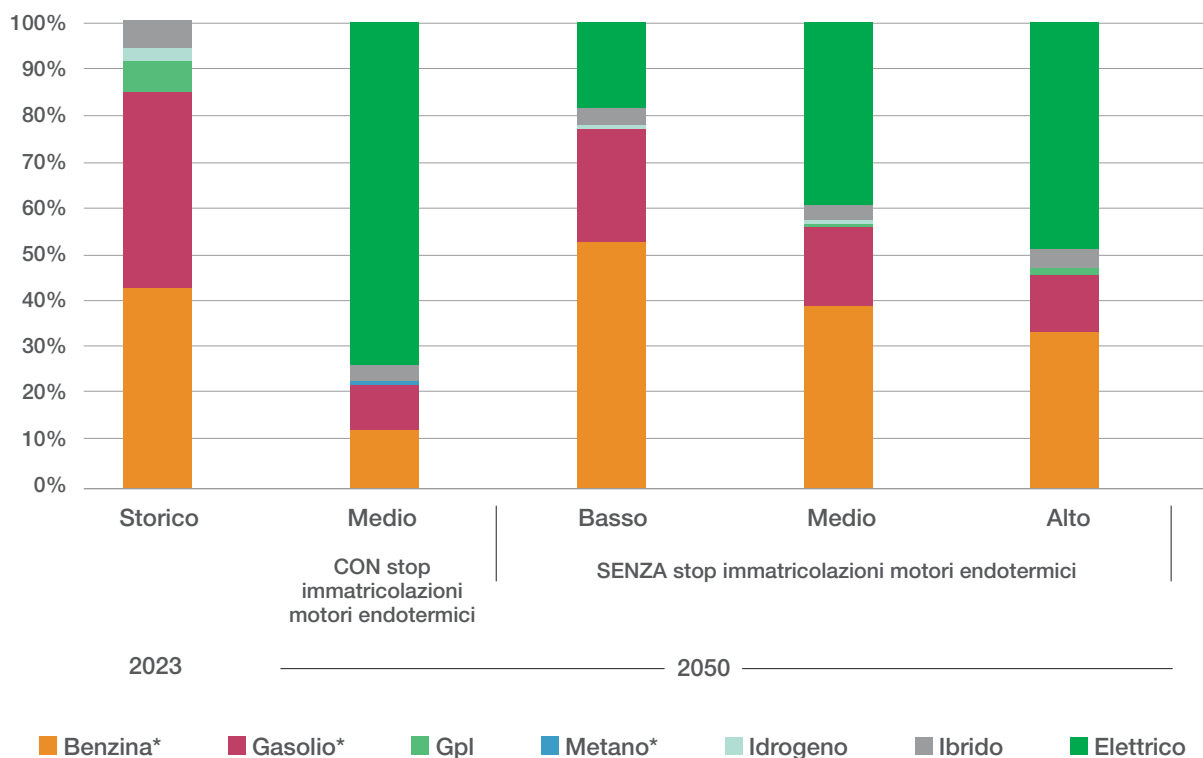
Per quanto riguarda i costi dei combustibili sono state fatte le seguenti assunzioni, comuni a tutti gli scenari:

- Implementazione del meccanismo ETS2 dal 2027 che prevede un pagamento per le emissioni di CO₂ applicato agli utilizzi diretti dei combustibili fossili che va quindi a incidere sul prezzo di alcuni dei vettori considerati nell'analisi quali: benzina, gasolio, gas naturale e GPL.
- Progressiva diffusione di combustibili alternativi, ivi inclusi biocombustibili come biometano e biodiesel e combustibili sintetici (benzina, metano e diesel sintetici) in percentuale crescente negli anni a partire dal 2040.

Evoluzione del parco circolante e dei consumi finali per le autovetture

Rispetto alle ipotesi sopra illustrate l'evoluzione del parco circolante mostra una notevole variabilità negli scenari analizzati come illustrato nella Figura 13.

Figura 13 Evoluzione parco circolante autoveicoli al 2050

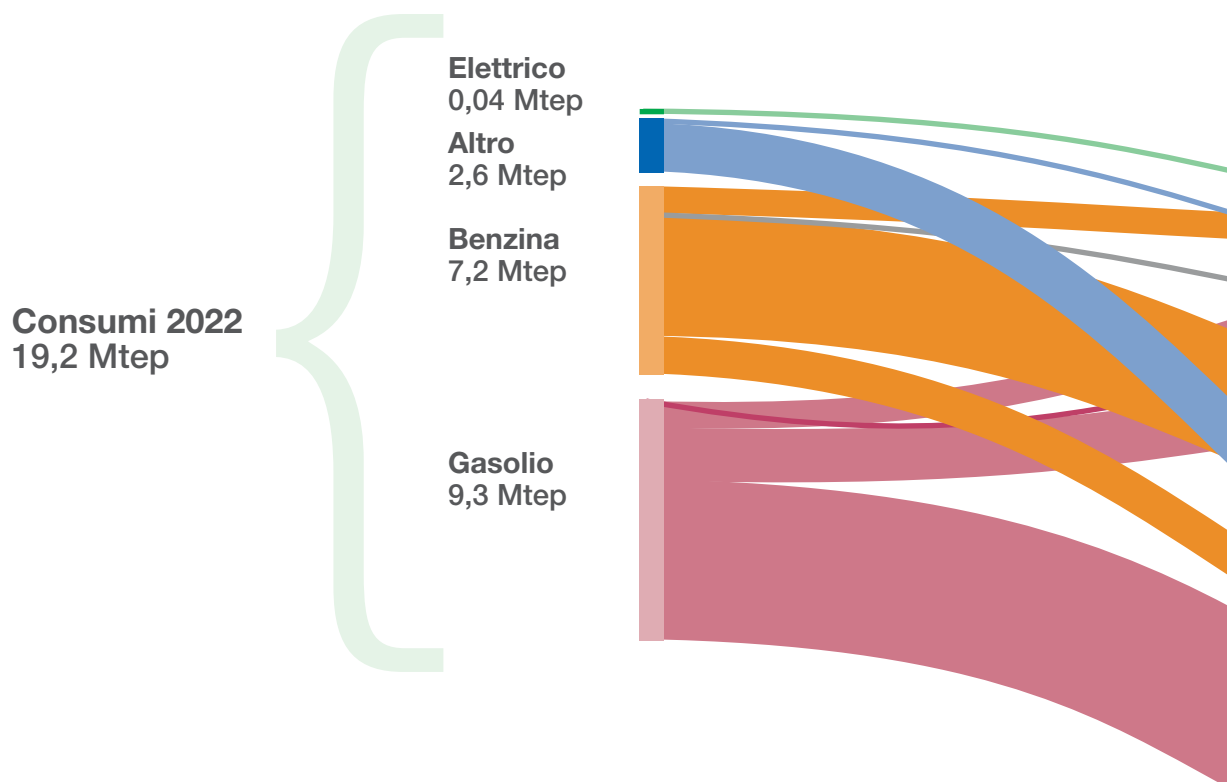


* Include combustibili sintetici e di origine biologica.

In tutti gli scenari, la tecnologia elettrica registra un marcato incremento rispetto ai dati storici, accompagnato da una progressiva riduzione delle autovetture con motore endotermico alimentate a benzina e, soprattutto, a gasolio, la cui quota percentuale cala sensibilmente.

Lo scenario con lo stop alle immatricolazioni dei motori endotermici è caratterizzato da un ricambio più veloce del parco esistente e una netta riduzione delle autovetture a gasolio e benzina, principalmente a favore di vetture elettriche, con quote residuali di ibride (immatricolate prima del 2035) e quote marginali per autovetture alimentate a idrogeno che, a tecnologie attuali, non sembrano rappresentare un'alternativa valida per questo segmento di mercato. La quota residua di auto tradizionali ancora in circolazione nel 2050 è costituita da veicoli immatricolati prima del 2035, caratterizzati da un'elevata età di oltre 15 anni e alimentati da un mix di combustibili fossili, biologici e sintetici. Le assunzioni relative al ricambio del parco circolante, infatti, considerano una riduzione della vita media delle autovetture rispetto allo storico che al 2050 raggiunge i 16 anni, giustificando quindi la presenza di autovetture alimentate a benzina.

Figura 14 Evoluzione consumi finali trasporto su gomma autovetture^{52,53}





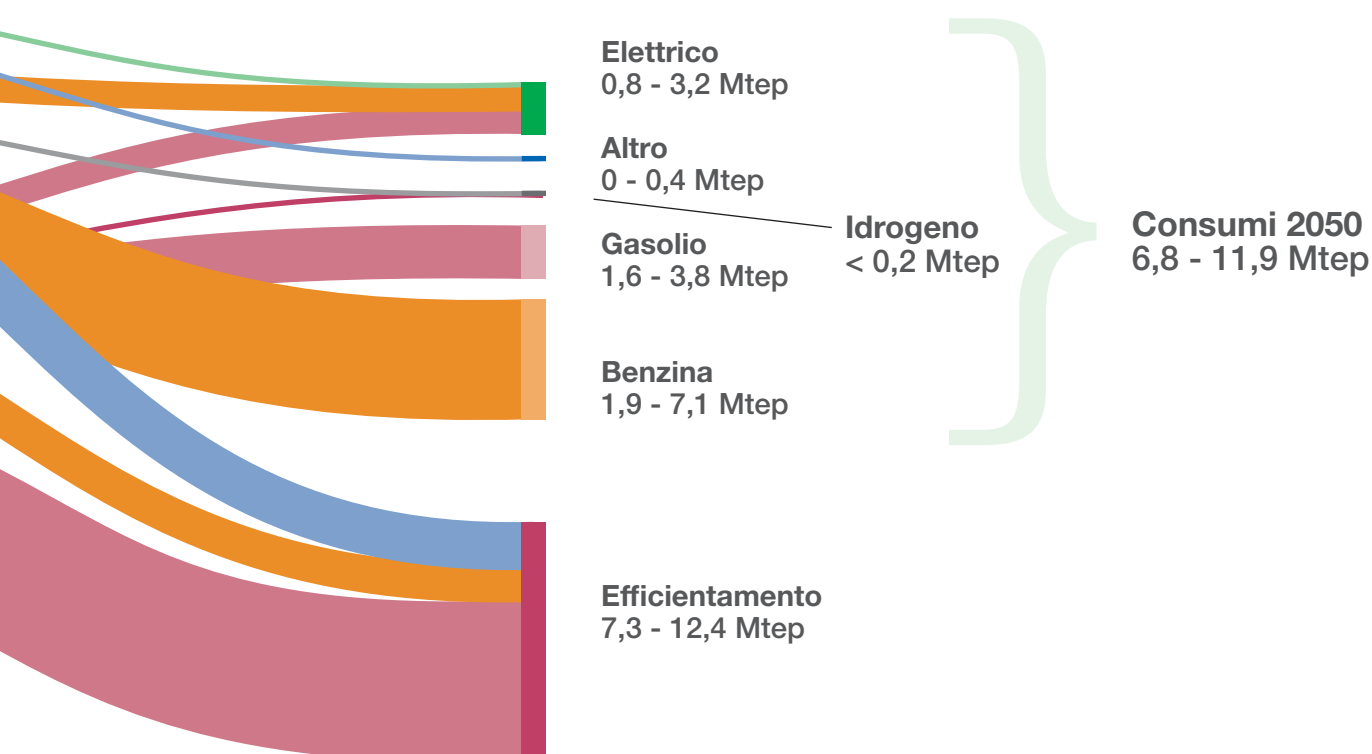
Negli scenari senza vincolo normativo sulle immatricolazioni a veicoli con motore endotermico la riduzione della quota di mercato delle auto a gasolio è significativa, mentre risulta più contenuta per quelle a benzina, le quali, secondo le ipotesi sulle commodity degli scenari Basso e Medio, vanno a sostituire parte del parco circolante a gasolio. Anche in questo contesto normativo la tecnologia elettrica sperimenta una notevole crescita, favorita da riduzione di capex e da un prezzo del combustibile più competitivo negli scenari Medio e Alto rispetto ai combustibili tradizionali.

La figura seguente riporta, in modo illustrativo, una possibile evoluzione dei consumi finali del trasporto su gomma legato alle autovetture ipotizzando la progressiva sostituzione del parco circolante esistente.

L'evoluzione dei consumi finali dipende da molti fattori, di cui la componente tecnologica è solo una di queste. La sostituzione del parco circolante italiano, uno dei più vecchi d'Europa, è un processo che coinvolge le scelte dei singoli utenti e che coinvolge un numero molto elevato di variabili che vanno dal costo dell'automobile, ai costi dei combustibili, dalla propensione dei singoli individui al cambiamento alla effettiva disponibilità tecnologica.

⁵² Esclude motocicli e trasporto pubblico su gomma.

⁵³ La categoria "Altro" include GPL e metano. Le quote di benzina e gasolio includono combustibili sintetici e di origine biologica.





L'analisi del sankey diagram mette in evidenza il rilevante cambiamento che coinvolge i consumi del trasporto su gomma privato tra il 2022 e il 2050 mostrandone una notevole riduzione. I consumi finali totali si riducono più del doppio nello scenario che considera l'attuale normativa relativamente alle immatricolazioni di motori endotermici. La riduzione è invece più contenuta nello scenario che prevede il rilassamento del vincolo normativo e che considera una riduzione di prezzo dei combustibili tradizionali rispetto all'alternativa elettrica o a idrogeno

Rispetto al 2022, la struttura dei consumi al 2050 evidenzia complessivamente un mix di vettori in cui benzina e diesel sono notevolmente ridimensionati per via della progressiva sostituzione del parco circolante esistente con le alternative elettriche o alimentate a combustibili alternativi di origine biologica o sintetica. Il ruolo dell'idrogeno è piuttosto limitato nel settore della mobilità privata, in linea con quanto definito dalla Strategia Nazionale per l'Idrogeno pubblicata a Novembre 2024.

La soluzione raffigurata graficamente fa riferimento a un punto medio nel ventaglio di scenari ipotizzati che delineano una notevole variabilità nei risultati finali, la quale rappresenta, a sua volta, l'elevata incertezza attorno all'evoluzione delle variabili considerate per l'analisi, come ampiamente discusso nei paragrafi precedenti.

Evoluzione del parco circolante e dei consumi finali per il trasporto merci pesante

Per quanto riguarda il trasporto merci pesanti⁵⁴, che include i mezzi superiori alle 3,5 t e i trattori stradali, è stata sviluppata la stessa analisi illustrata nei paragrafi precedenti, con l'unica variazione che riguarda gli scenari considerati. La normativa vigente, infatti, non prevede uno stop alle immatricolazioni di veicoli con motore endotermico al 2035, come invece avviene per il trasporto privato. Di conseguenza, gli scenari analizzati considerano solo la variazione sui prezzi delle commodities⁵⁵, in particolare, vengono considerati gli scenari già utilizzati per le autovetture (in tabella 5) che rappresentano:

- uno scenario Medio che fa riferimento all'evoluzione dei prezzi delle commodities ipotizzata nel DDS 2024;
- uno scenario Basso in cui il prezzo dei combustibili tradizionali fossili, biologici o sintetici è più basso dello scenario Medio, a parità di prezzo del vettore elettrico e dell'idrogeno;
- uno scenario Alto in cui il prezzo dei combustibili tradizionali fossili, biologici o sintetici è più alto dello scenario Medio, a parità di prezzo del vettore elettrico e dell'idrogeno.

⁵⁴ Si considerano i mezzi pesanti per il trasporto merci sopra le 3,5 t ed i trattori stradali.

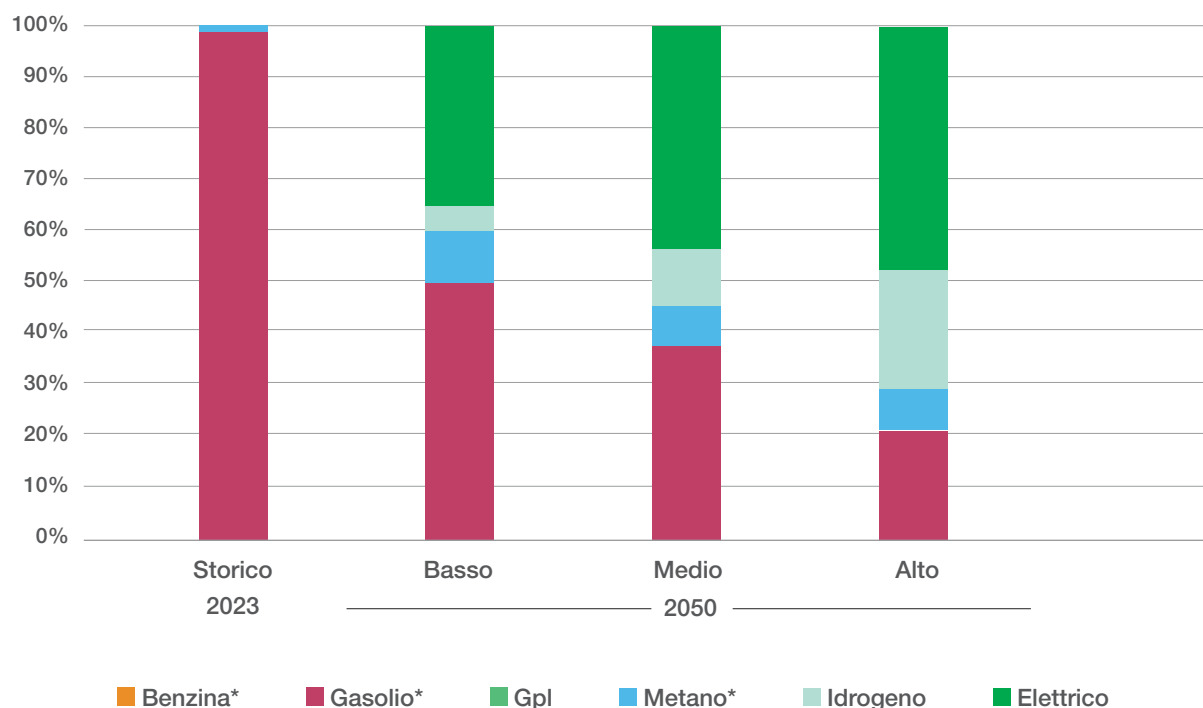
⁵⁵ I prezzi delle commodities per la mobilità pesante tengono conto dello sconto sull'IVA in vigore ad oggi.



Il grafico sottostante (Figura 15) riporta l'evoluzione del parco circolante negli scenari ipotizzati rispetto allo storico 2023: il percorso da seguire appare alquanto sfidante e complesso considerando che a oggi il 99% dei mezzi utilizzati per la mobilità pesante è alimentato a gasolio. Sarà necessario un profondo cambiamento dell'intero settore e della filiera associata per poter perseguire gli obiettivi 2050 che includa anche un progresso tecnologico.

Per la mobilità pesante, in ottica 2050, sono presenti diverse alternative ai tradizionali mezzi alimentati a gasolio che includono la trazione elettrica, mezzi alimentati a idrogeno o a GNL (incluso nel metano).

Figura 15 Evoluzione parco circolante mezzi pesanti al 2050



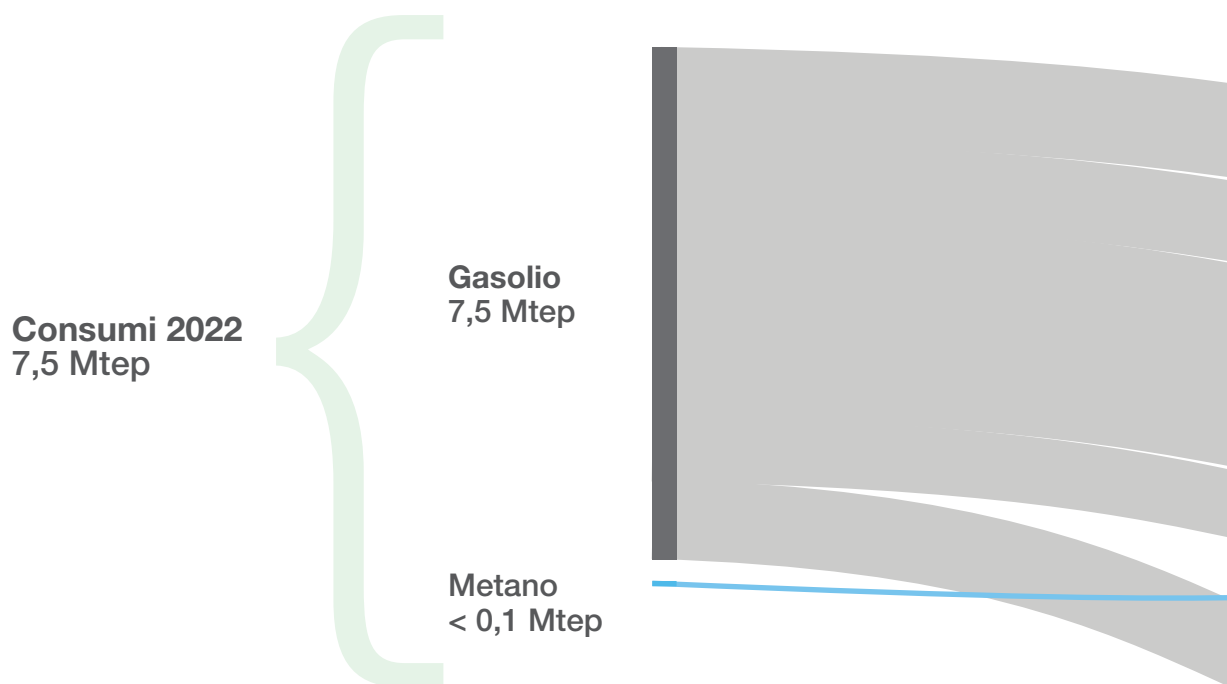
**Inclusa quota combustibili alternativi di origine biologica o sintetica*



Gli scenari analizzati mostrano una netta riduzione di mezzi alimentati a gasolio (fossile e di origine biologica o sintetica) a favore di alimentazioni alternative. Tra queste, l'elettrico si conferma la tecnologia più promettente in tutti gli scenari, grazie a una evoluzione tecnologica di mezzi full electric che, già oggi in forma prototipale, garantiscono autonomie elevate e compatibili con percorrenze commerciali di medio raggio, affiancato da una quota significativa di veicoli a idrogeno, con consumi in linea con le ipotesi della Strategia Nazionale per l'Idrogeno e da veicoli alimentati a GNL o bio-GNL, la cui presenza varia in funzione dello scenario considerato.

Per il trasporto pesante, a differenza di quello privato, l'idrogeno e il GNL si configurano come una soluzione competitiva e praticabile grazie a prestazioni analoghe ai carburanti convenzionali: rifornimenti rapidi, lunga autonomia e alta capacità di carico. L'idrogeno e il bio-GNL rappresentano quindi un'alternativa valida al gasolio anche nelle missioni di lungo raggio dove l'alternativa elettrica (per via dell'autonomia più bassa) è meno competitiva.

Figura 16 Evoluzione consumi finali trasporto su pesante su gomma⁵⁶

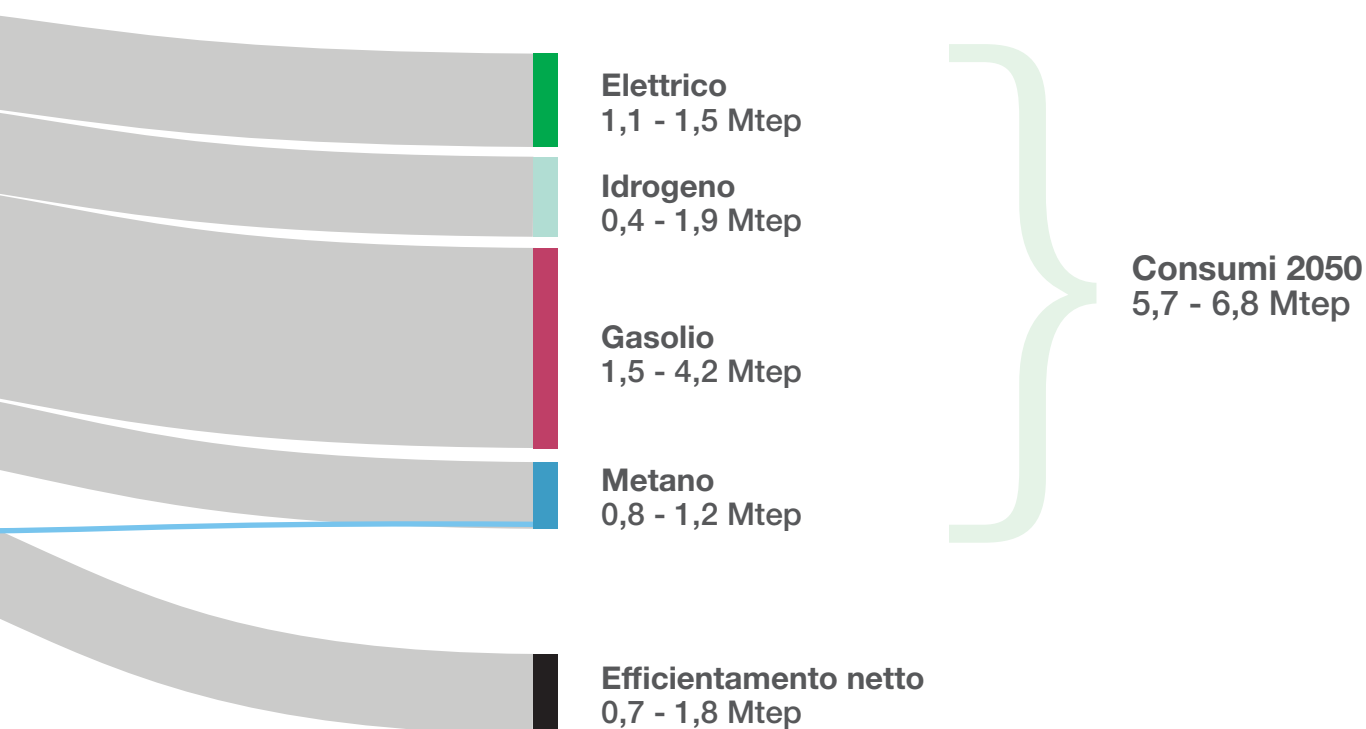




Rispetto allo scenario Medio, lo scenario Basso ipotizza prezzi dei combustibili tradizionali inferiori rispetto a elettrico e idrogeno, favorendo la permanenza di un numero superiore di mezzi alimentati a gasolio e una penetrazione maggiore del GNL. Al contrario, lo scenario Alto ipotizza prezzi dei combustibili tradizionali superiori, incentivando così la penetrazione di quote maggiori di elettrico e idrogeno a fronte di una quota inferiore di mezzi a gasolio.

La figura seguente riporta, in modo illustrativo, una possibile evoluzione dei consumi finali del trasporto merci pesante su gomma ipotizzando la progressiva sostituzione del parco circolante esistente.

⁵⁶Le quote di gasolio e metano includono combustibili sintetici e di origine biologica.





Il sankey diagram mette in evidenza il cambiamento che coinvolge i consumi del trasporto merci su gomma tra il 2022 e il 2050 mostrandone una riduzione e un notevole cambiamento nei vettori utilizzati.

Nel caso del trasporto merci, l'aumento della domanda, in assenza di un cambio tecnologico determinerebbe una crescita dei consumi energetici. Tale crescita è compensata dallo shift verso tecnologie più efficienti, che comportano una riduzione dei consumi e di conseguenza un efficientamento netto finale.

Rispetto al 2022, la struttura dei consumi al 2050 evidenzia complessivamente un mix di vettori in cui il gasolio si riduce notevolmente in analogia con la progressiva sostituzione del parco circolante a favore del vettore elettrico e dell'idrogeno. Come per l'idrogeno, anche il metano rappresenta un'alternativa valida per il trasporto pesante, aumentando la propria quota al 2050. Il diesel ancora presente al 2050 include combustibili sintetici e di origine biologica.

La soluzione rappresentata graficamente fa riferimento a un punto medio nel ventaglio di scenari ipotizzati che delineano una notevole variabilità nei risultati finali derivante, a sua volta, dall'elevata incertezza attorno all'evoluzione delle variabili considerate per l'analisi, come ampiamente discusso nei paragrafi precedenti.





8.2. Prospettive di evoluzione del trasporto marittimo

Il trasporto marittimo, vettore strategico per la movimentazione delle merci a livello globale, si trova oggi al centro di un processo di transizione energetica che dovrà accelerare significativamente per allinearsi agli obiettivi europei di neutralità climatica al 2050. Attualmente alimentato in larga parte da combustibili fossili ad alta intensità carbonica, il settore è soggetto a nuove normative stringenti, come l'iniziativa FuelEU Maritime, che prevede una progressiva riduzione dell'intensità carbonica dei combustibili utilizzati: -2% entro il 2025, -14,5% al 2035 e fino a -80% entro il 2050 rispetto ai livelli del 2020. Tali obiettivi impongono una riconfigurazione sostanziale del mix energetico impiegato nel comparto.

Nel breve periodo, il GNL (gas naturale liquefatto) rappresenta una soluzione che consente una riduzione immediata delle emissioni. Il potenziale del bio-GNL, ottenuto da fonti rinnovabili, potrà ulteriormente ampliare i benefici ambientali, avvicinando il settore a una traiettoria "net-zero". Nel medio-lungo periodo, il settore dovrà evolvere anche attraverso l'adozione di altri vettori energetici alternativi a zero o basse emissioni, quali l'ammoniaca, l'idrogeno il metanolo rinnovabili, i biocarburanti avanzati, nonché gli e-fuels, combustibili sintetici prodotti utilizzando CO₂ catturata e idrogeno rinnovabile.

A supporto di questa transizione, gioca un ruolo fondamentale anche l'evoluzione delle infrastrutture portuali, che dovranno abilitare nuovi standard operativi a basso impatto. In particolare, l'adozione diffusa del cold ironing – ovvero l'alimentazione elettrica delle navi durante le soste in porto – rappresenta una misura chiave per la decarbonizzazione delle emissioni portuali. L'implementazione di tale tecnologia, alimentata da fonti rinnovabili, consente l'azzeramento delle emissioni locali di CO₂, NOx e PM durante le soste, che in alcuni porti italiani generano attualmente centinaia di migliaia di tonnellate di CO₂ equivalenti all'anno (es. oltre 165.000 tCO₂eq nel porto di Livorno nel 2023 e circa 376.000 tCO₂eq nei porti del Mar Ligure Occidentale).

Sotto il profilo quantitativo, il trasporto marittimo mondiale ha già superato nel 2024 i 12,6 miliardi di tonnellate di merci trasportate, con previsioni di ulteriore crescita al 2050. Tuttavia, l'evoluzione reale del settore potrebbe essere condizionata dalle dinamiche economiche derivanti dall'introduzione del sistema ETS europeo e dal potenziale shift modale verso il trasporto su gomma. È quindi necessario monitorare con attenzione l'evoluzione dei costi regolatori, per evitare distorsioni che possano rallentare il cambio di paradigma energetico.

Nel complesso, la decarbonizzazione del trasporto marittimo richiederà un approccio tecnologicamente neutro, sostenuto da policy industriali coerenti, incentivi mirati e una pianificazione infrastrutturale integrata. In tale contesto, l'Italia – grazie alla posizione geografica strategica e al ruolo dei suoi porti nel traffico mediterraneo – potrà svolgere un ruolo guida nello sviluppo di soluzioni logistiche e tecnologiche a basso impatto climatico, contribuendo attivamente al processo di transizione del sistema energetico dei trasporti.



BOX DI APPROFONDIMENTO: il cold ironing

Il *cold ironing* è una tecnologia che consente alle navi ormeggiate nei porti di spegnere i motori di bordo e di alimentarsi tramite connessione elettrica a terra. Questo sistema, composto da infrastrutture a terra e a bordo, è finalizzato a ridurre le emissioni inquinanti e l'inquinamento acustico, migliorando la qualità ambientale nelle aree portuali.

A oggi le maggiori criticità legate alla diffusione di questa tecnologia sono legate ai costi elevati, sia per l'adeguamento infrastrutturale sia per la compatibilità delle navi, soprattutto quelle più datate, oltre che per il costo dell'elettricità.

A livello europeo, la spinta normativa più rilevante arriva dal Regolamento AFRI ((UE) 2023/1804) che impone agli Stati membri obiettivi vincolanti per lo sviluppo di infrastrutture dedicate ai combustibili alternativi. In particolare, per i porti marittimi appartenenti alla rete TEN-T (Trans-European Transport Network, ovvero Rete Transeuropea dei Trasporti) è previsto che entro il 31 dicembre 2029 sia garantita una fornitura minima di energia elettrica da terra per le navi portacontainer e passeggeri. Il regolamento stabilisce inoltre che tali sistemi siano conformi a standard tecnici internazionali e prevede l'adozione di atti delegati per assicurare la piena interoperabilità tra le infrastrutture e le navi.

Nel contesto italiano, il cold ironing è inserito sia nel PNIEC (Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima) sia nel PNRR (Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza), come misura strategica per la decarbonizzazione del trasporto marittimo. Il piano nazionale prevede la realizzazione di 682 MW di potenza elettrica installata per il cold ironing, distribuiti su 34 porti italiani. Sul piano regolatorio, l'ARERA, con la deliberazione 492/2024/R/EEL, ha previsto sconti sulle componenti tariffarie degli oneri generali di sistema per l'energia elettrica prelevata dalle Infrastrutture di Cold Ironing (IdC).



8.3. Conclusioni

Le analisi e gli approfondimenti illustrati nei capitoli precedenti mettono in luce come la decarbonizzazione del settore trasporti rappresenti una sfida molto complessa, in cui intervengono fattori di carattere tecnologico, normativo, sociali e non ultimo di abitudini, soprattutto in una proiezione di lungo termine che coinvolge il trasporto delle merci e delle persone.

Un importante contributo a riguardo è stato portato dalle interazioni con esperti provenienti da associazioni e istituzioni di riferimento nel settore trasporti che hanno aiutato a focalizzare le analisi e a rappresentare la complessità del settore e del quadro normativo che lo caratterizza con regolamenti stringenti e in continua evoluzione.

Dal lavoro svolto congiuntamente da Snam e Terna e dagli incontri è quindi emerso che, per raggiungere gli obiettivi di lungo termine, l'evoluzione tecnologica del settore trasporti verso soluzioni più sostenibili risulta essere imprescindibile, ma tale evoluzione rimane soggetta a una serie di variabili che ne rendono alquanto sfidante ogni cambiamento. Gli attori coinvolti sono molteplici: dai singoli cittadini che devono cambiare un'automobile alle aziende che devono dotarsi di parco veicoli o di mezzi per il trasporto merci. La resistenza al cambiamento, la disponibilità tecnologica, i costi di acquisto e gestione, le normative in evoluzione sono solo alcuni degli elementi da tenere in considerazione quando si affronta il tema del rinnovamento del parco circolante e, più in generale, di una transizione verso un sistema di trasporto a basso impatto emissivo. Questa sfida è particolarmente importante per l'Italia che ha un parco auto tra i più estesi nonché vetusti d'Europa, nel quale l'utilizzo dell'automobile è estremamente diffuso e, in alcuni casi, necessario anche per gli spostamenti quotidiani.

Lo studio della struttura del settore e delle normative ha consentito di identificare il trasporto privato e il trasporto pesante su gomma, responsabili di oltre il 90% delle emissioni dell'intero settore trasporti italiano, come i segmenti su cui concentrare le analisi.

Utilizzando un approccio di convenienza economica delle tecnologie basato sui TCO (Total Cost of Ownership), sono stati elaborati degli scenari di diffusione in differenti condizioni di competitività tra combustibili sia per il trasporto merci che per il trasporto privato. In particolare, per quanto riguarda quest'ultimo, agli scenari che ipotizzano diversi prezzi dei combustibili sono stati accoppiati anche degli scenari normativi. Ovvero è stato considerato il caso, come da normativa vigente, che impone uno stop alle immatricolazioni di veicoli a motore endotermico dal 2035 e un caso in cui questo vincolo viene rilassato, con l'obiettivo di cogliere l'incertezza normativa riguardo questo tema.

Nel caso del trasporto privato tutti gli scenari mostrano una progressiva riduzione delle autovetture a motore endotermico alimentate a benzina e gasolio la cui quota percentuale scende notevolmente rispetto allo storico, in particolare per quanto riguarda il gasolio. Sia per il gasolio che per la benzina vengono ipotizzati diversi livelli di penetrazione dei biocombustibili. La tecnologia elettrica rappresenta



l'alternativa ai motori endotermici e in tutti gli scenari ipotizzati vede un notevole incremento rispetto allo storico; ci sono poi quote marginali per autovetture alimentate a idrogeno che, a tecnologie attuali, non sembrano rappresentare un'alternativa valida per questo segmento di mercato. Due dei principali elementi che vanno a incidere sulla riduzione dei consumi e delle emissioni del settore sono la progressiva riduzione del parco autovetture circolante in favore di un passaggio verso la mobilità pubblica o verso altri mezzi di trasporto privati e l'ampia diffusione di veicoli elettrici che favoriscono l'efficientamento.

Nel caso del trasporto pesante su gomma, dove la normativa non prevede alcuna restrizione sulla tipologia di veicoli immatricolati, si osserva una netta riduzione di mezzi alimentati a gasolio (fossile e di origine biologica o sintetica) in favore di alimentazioni alternative che includono la soluzione elettrica con un'elevata penetrazione in tutti gli scenari, una quota considerevole di mezzi alimentati a idrogeno, i cui consumi sono confrontabili con quanto ipotizzato nella Strategia Nazionale per l'Idrogeno, e mezzi alimentati a GNL in quota variabile a seconda dello scenario. L'effetto dell'efficientamento è presente anche nel trasporto pesante, ma in misura minore rispetto al trasporto privato.

Nel trasporto marittimo, la decarbonizzazione passa principalmente attraverso l'adozione di carburanti alternativi come bio-GNL, ammoniaca e idrogeno, in linea con la normativa FuelEU Maritime. Lo sviluppo di tecnologie adeguate e infrastrutture portuali dedicate sarà fondamentale, soprattutto per accelerare la transizione nel cabotaggio e nelle rotte a corto raggio, mentre per i traffici internazionali i tempi di diffusione restano più lunghi.

A oggi i diversi sottosettori sono caratterizzati da livelli di maturità e sviluppo diversi in tema di transizione energetica. Ad esempio, nel settore della mobilità pubblica la transizione è già in atto e la penetrazione di nuove tecnologie in sostituzione di quelle alimentate a combustibili fossili già in crescita. Per altri sottosettori la transizione deve ancora concretizzarsi davvero nonostante ci siano già indirizzi ben precisi, ne è un esempio la mobilità leggera per la quale la strada verso un abbattimento delle emissioni in termini tecnologici e normativi è a oggi delineata. Lo stesso non si può dire della mobilità pesante per la quale manca una chiara visione sia in termini sia di tecnologie che di infrastrutture nel lungo termine.

In conclusione, il percorso verso la decarbonizzazione del settore trasporti è tracciato, ma la sua attuazione richiederà una regia coordinata tra istituzioni, operatori e cittadini, capace di coniugare innovazione, sostenibilità economica e pragmatismo. A oggi i diversi sottosettori sono caratterizzati da livelli di maturità e sviluppo diversi in tema di transizione energetica. Ad esempio, nel settore della mobilità pubblica la transizione è già in atto e la penetrazione di nuove tecnologie in sostituzione di quelle alimentate a combustibili fossili sta già crescendo. Inoltre, se per quanto riguarda la mobilità leggera la strada verso un abbattimento delle emissioni in termini tecnologici e normativi è a oggi delineata, lo stesso non si può dire della mobilità pesante per la quale manca una chiara visione sia in termini di tecnologie che di infrastrutture nel lungo termine. La sfida è ambiziosa, ma rappresenta anche un'opportunità strategica per ridisegnare un sistema di mobilità più efficiente, resiliente e a misura di futuro.

