



Decarbonizzare i trasporti

Evidenze scientifiche e proposte di policy

Aprile 2022



Mims

Ministero delle infrastrutture
e della mobilità sostenibili

Il presente documento è stato elaborato dagli esperti coinvolti dal MIMS nell'ambito della "*Struttura per la transizione ecologica della mobilità e delle infrastrutture*" (STEMI) istituita dal Ministro delle infrastrutture e della mobilità sostenibili con Decreto n. 504 del 10 dicembre 2021. La STEMI ha il compito di elaborare indicazioni di *policy* per la transizione ecologica della mobilità e delle infrastrutture, anche alla luce dell'attuale discussione in sede di Consiglio europeo del Pacchetto *Fit for 55* presentato dalla Commissione europea in attuazione della strategia del Green Deal. Il presente documento si pone in un'ideale linea di continuità con il Rapporto "*Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili*", presentato il 4 febbraio 2022, rappresentandone un'appendice dedicata specificamente al tema delle tecnologie utili alla decarbonizzazione dei trasporti.

A cura di:

Nicola Armaroli (*Consiglio Nazionale delle Ricerche*)

Carlo Carraro (*Università Ca' Foscari Venezia*)

Pierpaolo Cazzola (*University of California, Davis, European Research Center - Institute of Transportation Studies*)

Elisabetta Cherchi (*Newcastle University*)

Mara Tanelli (*Politecnico di Milano*)

Massimo Tavoni (*Politecnico di Milano*)

Andrea Tilche (*NTNU, Segreteria Tecnica MITE*)

Michele Torsello (*MIMS*)

Supporto organizzativo:

Mirko Procopio (*MIMS*)

Indice

1. IL CONTESTO POLITICO, SCIENTIFICO E TECNOLOGICO	5
LA SITUAZIONE ITALIANA NEL QUADRO DEGLI IMPEGNI INTERNAZIONALI ED EUROPEI SUL CLIMA E LE EMISSIONI	5
GLI OBIETTIVI DEL DOCUMENTO	8
LA DECARBONIZZAZIONE DEI MEZZI DI TRASPORTO	10
2. DECARBONIZZARE IL TRASPORTO STRADALE	15
PARCO CIRCOLANTE E TECNOLOGIE DISPONIBILI	15
AUTOMOBILI	16
<i>Veicoli elettrici: BEV</i>	16
<i>Ibridi: PHEV e HEV</i>	18
<i>Idrogeno: FCEV e HICEV</i>	19
<i>Metano e biometano: GNC e LNG</i>	21
<i>Biocombustibili liquidi da colture dedicate</i>	23
<i>Biocombustibili liquidi da rifiuti (e altri di II generazione)</i>	23
<i>Idrocarburi sintetici</i>	24
TRASPORTO COMMERCIALE LEGGERO	25
TRASPORTO COMMERCIALE PESANTE	26
<i>Infrastrutture per la decarbonizzazione del trasporto pesante su lunghe distanze</i>	31
TRASPORTO PUBBLICO LOCALE	32
MOTOCICLI	33
3. DECARBONIZZARE IL TRASPORTO FERROVIARIO	35
IL QUADRO GENERALE	35
ELETTRIFICAZIONE ALTERNATIVA: FUEL CELL E BATTERIE	35
METANO E ALTRE OPZIONI	36
INFRASTRUTTURE FERROVIARIE ED EMISSIONI SUL CICLO DI VITA	36
4. DECARBONIZZARE IL TRASPORTO NAVALE	38
PRIMO OBIETTIVO: EFFICIENZA	38
TECNOLOGIE E COMBUSTIBILI ALTERNATIVI	39
<i>Elettrificazione dei porti</i>	39
<i>Elettrificazione delle navi</i>	40

Combustibili alternativi sulle grandi distanze	40
Biocombustibili.....	43
COMPENSAZIONE DELLE EMISSIONI	47
PRIORITÀ PER LA DECARBONIZZAZIONE DEL SETTORE	48
5. DECARBONIZZARE IL TRASPORTO AEREO	50
PRIMO OBIETTIVO: EFFICIENZA	50
SUSTAINABLE AVIATION FUELS	51
COMPENSAZIONE DELLE EMISSIONI	53
SISTEMI DI PROPULSIONE ALTERNATIVI.....	54
<i>Prospettive di sviluppo per l'aviazione elettrica</i>	54
<i>Aerei a idrogeno</i>	56
PRIORITÀ PER LA DECARBONIZZAZIONE DEL SETTORE	57
6. COSTI E POTENZIALE DELLE DIVERSE STRATEGIE DI DECARBONIZZAZIONE DEI TRASPORTI.....	58
COSTI DI ABBATTIMENTO E POTENZIALE DI RIDUZIONE DELLE EMISSIONI E DI CONSUMI DI ENERGIA ..	58
I COSTI DEGLI INVESTIMENTI INFRASTRUTTURALI PER L'ELETTRIFICAZIONE DEL TRASPORTO	
AUTOMOBILISTICO.....	62
IL RUOLO DELL'INNOVAZIONE E DEL PROGRESSO TECNICO VERSO IL 2030 E OLTRE	65
7. PRIORITÀ TECNOLOGICHE.....	70
SINTESI DELLE STRATEGIE TECNOLOGICHE E DELLE LORO PRIORITÀ.....	70
RIPERCUSSIONI DELLA SICUREZZA ENERGETICA PER LA DECARBONIZZAZIONE DEI TRASPORTI.....	73
CONCLUSIONI E RACCOMANDAZIONI	76
8. DOMANDE FREQUENTI.....	82
COMBUSTIBILI E TECNOLOGIE.....	82
TRASPORTO STRADALE LEGGERO	87
TRASPORTO STRADALE PESANTE E TPL	90
TRASPORTO NAVALE	91
BATTERIE	92
9. APPENDICE	95



1. Il contesto politico, scientifico e tecnologico

La situazione italiana nel quadro degli impegni internazionali ed europei sul clima e le emissioni

Le basi scientifiche disponibili sul fenomeno del cambiamento climatico – illustrate in numerosi rapporti dell'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) pubblicati dal 1990 ad oggi – hanno dimostrato l'assoluta **necessità di mantenere in futuro la crescita della temperatura media del Pianeta tra 1,5 e 2,0°C**, facendo il possibile per restare nei valori inferiori di questa forchetta. D'altra parte, gli impegni internazionali assunti dall'Unione europea (UE) con l'Accordo di Parigi del 2015 hanno condotto all'adozione di una legge europea sul clima che **impegna l'Unione a raggiungere entro il 2030 una riduzione del 55%** delle emissioni climalteranti rispetto al 1990 **e ad arrivare entro il 2050 allo "zero netto di emissioni"** (la cosiddetta "neutralità carbonica"). Per conseguire tali obiettivi di riduzione delle emissioni la Commissione europea (CE) ha presentato dal luglio 2021 diverse proposte settoriali, legate alla strategia per la transizione ecologica del c.d. *Green Deal* europeo, tra cui si segnalano quelle connesse al cosiddetto "*Pacchetto Fit for 55*" (FF55).

Il presente documento analizza, per ciò che concerne il tema della mobilità, le scelte tecnologiche e non-tecnologiche necessarie a raggiungere i target stabiliti di emissioni e la loro articolazione proposta nel pacchetto FF55. L'analisi è stata sviluppata considerando che gli aspetti economici e sociali della transizione ecologica vanno inseriti in un quadro di raggiungimento degli obiettivi delle emissioni, nella consapevolezza che questa trasformazione epocale aprirà **grandissime nuove opportunità di crescita, ma anche dei rischi** dovuti ad attività economiche o a processi produttivi che dovranno essere profondamente ristrutturati entro il 2050. In questa prospettiva, l'ingresso dell'Italia, con i tempi giusti, nelle nuove catene del valore che si stanno creando nel campo dei trasporti non può essere un esercizio passivo, specie per quanto riguarda tecnologie meno impattanti in termini ambientali. Infatti, l'uso progressivo di tali tecnologie può essere ottimizzato in modo da minimizzarne i costi e contribuire a raggiungere una maggiore produttività economica del sistema, stimolando quindi anche la crescita economica.

Cogliere le opportunità legate alla transizione del sistema dei trasporti comporta rilevanti scelte industriali, tecnologiche, di ricerca e sviluppo e di mercato che devono essere opportunamente facilitate e accompagnate dalle politiche pubbliche. Questo processo non inizia oggi, ma è già in corso da molti anni nell'Unione europea, con il sistema di scambio dei diritti di emissione ETS lanciato nel 2005, il Regolamento per la condivisione degli sforzi di abbattimento delle emissioni climalteranti, le progressive normative sulle emissioni dei motori e con le diverse direttive in campo energetico per promuovere la diffusione di energie rinnovabili.

La crisi internazionale legata all'invasione dell'Ucraina ha riportato in primo piano gli **aspetti geopolitici dell'energia** e ha messo in luce le profonde criticità legate alla forte dipendenza italiana ed europea dall'estero per l'approvvigionamento di combustibili fossili e ancora di più la dipendenza energetica da Paesi retti da regimi non democratici. Coerentemente con le comunicazioni della Commissione europea e con il progetto *RePowerEU*, si pone la necessità di un'accelerazione del processo di decarbonizzazione previsto dal *Green Deal* europeo, non solo per rispondere all'emergenza climatica ma anche come mezzo per raggiungere una maggiore indipendenza e sicurezza energetica, una maggior stabilità dei prezzi e costi inferiori per i consumatori.

Più in generale, le tematiche della decarbonizzazione dei trasporti vanno collocate anche nel quadro più ampio dell'**Agenda 2030 dell'Organizzazione delle Nazioni Unite** e dei 17 *Sustainable Development Goals (SDGs)*, quindi tenendo conto in modo interconnesso di molteplici obiettivi, come: la sicurezza e l'accessibilità dei trasporti, la riduzione delle emissioni di inquinanti locali (che hanno rilevanti effetti negativi per la salute), la riduzione delle congestioni del traffico, la sicurezza energetica, la connettività, lo sviluppo industriale, la crescita economica, l'equità e la creazione di occupazione dignitosa.

In Italia, il settore dei trasporti era responsabile nel 2019 (ultimo anno pre-Covid) **del 25,2% delle emissioni totali di gas ad effetto serra e del 30,7% delle emissioni totali di CO₂. Il 92,6% di tali emissioni sono attribuibili al trasporto stradale.** Peraltro, se in Italia le emissioni si sono ridotte dal 1990 al 2019 del 19%, i trasporti sono uno dei pochi settori che hanno riportato **una crescita di emissioni** (+3,2% rispetto al 1990), congiuntamente a quelli residenziale, dei servizi e dei rifiuti.

Le emissioni climalteranti in Italia sono rappresentate per l'81% da CO₂ derivante dalla combustione di combustibili fossili, per il 10% circa da metano (di cui un 30% circa – valore oggi considerato sottostimato – deriva dal settore *oil&gas* come emissioni fuggitive¹), per un 5% circa da protossido d'azoto di provenienza prevalentemente agricola e da un 4% (percentuale in rapida crescita) di gas fluorurati utilizzati nell'industria. Per quanto concerne il metano, un forte intervento di limitazione delle perdite, a causa del suo alto potenziale climalterante ma anche della sua breve vita media nell'atmosfera, sarebbe in grado di produrre effetti sensibili

¹ I dati delle emissioni fuggitive di metano non sono misurati, ma stimati dagli operatori della rete del gas e comunicati a ISPRA che li pubblica negli inventari. Questa modalità è diffusa anche in altri Paesi. Vi è forte consenso sul fatto che, quando verranno effettuate misure dirette, questa quota sia destinata a crescere. Ad esempio, recenti campagne di misura effettuate in aree metropolitane come Parigi, Boston e Philadelphia hanno evidenziato che le emissioni fuggitive misurate nelle aree urbane sono dalle due alle quattro volte superiori a quelle stimate in precedenza.

sulla riduzione della crescita della temperatura². Nella considerazione del metano, del biometano e del biogas come gas di transizione – anche nei settori dei trasporti – va quindi sempre considerato **il rischio che le emissioni fuggitive annullino completamente o peggiorino i profili di footprint climatico**³. Un numero crescente di evidenze scientifiche suggerisce che, specie in assenza di investimenti per la minimizzazione delle emissioni sul ciclo di vita, il gas possa avere, lungo tutta la filiera, un'impronta climatica addirittura superiore a quella derivante dall'uso del carbone⁴.

Considerando la quota di energie rinnovabili presente nel sistema di generazione elettrica, il settore dei trasporti consumava nel 2019 circa 1,6 EJ/anno (38,6 Mtep/anno) di combustibili fossili, a cui andrebbero aggiunti i consumi dovuti alla raffinazione eseguita in ambito nazionale. Questi dati non includono le emissioni relative alla realizzazione e manutenzione di infrastrutture di trasporto, né quelle relative alle produzioni industriali e dei servizi del settore, ma rappresentano soltanto le emissioni direttamente attribuibili alla movimentazione di passeggeri e di merci. La forte ripresa post-Covid avvenuta in Italia nel 2021 ha comunque visto un abbassamento annuale delle emissioni serra del 4,8% rispetto al 2019, pur in presenza di un sostanziale incremento nel secondo semestre.

I trasporti (dati ISPRA) generano inoltre una quota molto consistente delle **emissioni in atmosfera di altri inquinanti**: il 40,3% degli ossidi di azoto (NO_x), l'11,4% dei composti organici volatili non metanici (COVNM), il 10,1% di polveri sottili (PM) e il 18,7% di monossido di carbonio (CO). In particolare, per gli ossidi di azoto (NO_x) e le polveri sottili l'Italia è sotto procedura d'infrazione per mancato rispetto delle Direttive europee sulla qualità dell'aria.

La produzione di polveri sottili regolamentate (PM₁₀, PM_{2,5}) da parte dei mezzi di trasporto in ambito urbano è dovuta non soltanto ai motori a combustione interna ma anche ai freni, al manto stradale e ai pneumatici, anche se queste particelle che non derivano dalla combustione sono molto grosse e pesanti e tendono a non restare sospese in aria. Inoltre, anche se in termini di massa totale queste rappresentano circa il 50% delle polveri, da un punto di vista numerico rappresentano una piccola frazione, con un conseguente minore impatto sulla salute. **Molti effetti negativi sulla salute sono dovuti alla penetrazione nelle mucose e membrane cellulari da parte delle particelle più fini** (100-1.000 volte più piccole dei 2,5 micron che definiscono il PM_{2,5}), che possono introdursi oltre la barriera alveolare ed entrare nella circolazione corporea. Purtroppo, per mancanza di misurazioni di queste particelle (il PM_{2,5} è la frazione più fine misurata dalle stazioni) non è ancora possibile avere una correlazione precisa e quindi stabilire dei limiti.

Queste particelle ultrafini sono prodotte principalmente dalla combustione, sia di biomassa che di combustibili fossili, nei sistemi di riscaldamento civile e industriale e nei motori (auto, camion, aerei). I motori diesel di nuova

² Va notato che le perdite di metano in atmosfera vanno evitate anche se si tratta di biogas o biometano, dato che l'effetto climalterante è evidentemente lo stesso sia per il metano di origine fossile, che per il metano di origine biologica.

³ Una simile considerazione riguarda il gas proveniente dagli Stati Uniti, dove viene estratto con la tecnica del *fracking*, associata a maggiori emissioni in fase estrattiva rispetto a tecnologie convenzionali.

⁴ Y. Chen, E. D. Sherwin, E. S. F. Berman, B. B. Jones, M. P. Gordon, E. B. Wetherley, et al., Environ. Sci. Tech. 2022, DOI: 10.1021/acs.est.1c064582

generazione per autovetture (Euro 6) sottostanno a un limite di 600 miliardi di particelle al chilometro e l'effetto del filtro antiparticolato si estende anche alle particelle al di sotto di 2,5 micron, mentre quelli a benzina e a metano non sono sottoposti a tale limite e quindi non sono forniti di filtri. In certi casi, questi motori possono emettere fino a 100 volte più di particelle ultrafini, in termini numerici, di un motore diesel filtrato⁵.

I motori diesel Euro VI per mezzi pesanti, per rispettare i limiti di emissioni, sono oggi equipaggiati da sofisticati sistemi di trattamento dei fumi che riescono ad abbattere efficacemente NO_x e PM in condizioni normali di viaggio. Peraltro, l'utilizzo di additivi a base di urea, in certe condizioni di esercizio, comporta nuove emissioni – prima assenti – di N₂O (un potente gas serra) e di ammoniaca (NH₃, un inquinante atmosferico anche precursore di aerosol) che sono attualmente regolati (per quanto riguarda l'ammoniaca) solo nel caso dei mezzi pesanti per il trasporto su gomma⁶.

Va sottolineato infine che i dati sui PM sopra riportati si riferiscono alle emissioni *primarie*, cioè dirette. Tuttavia, una frazione preponderante del particolato atmosferico è di origine *secondaria*, cioè si forma in atmosfera a partire da inquinanti precursori come NO_x (in gran parte ancora originato dalle emissioni dei motori a combustione interna), metano (che include le emissioni fuggitive già citate nell'estrazione e nella raffinazione degli idrocarburi e nella distribuzione del gas, anche come combustibile per autotrazione) e NH₃ (prevalentemente di origine agricola, ma come già detto presente nelle emissioni dei motori diesel per autotrasporto).

Gli obiettivi del documento

La grande importanza del settore dei trasporti nel quadro delle emissioni nazionali e la sua fortissima dipendenza dai combustibili fossili ne fanno **il settore cardine della strategia di riduzione delle emissioni**.

La decarbonizzazione dei trasporti e dei servizi di mobilità – di cui le pagine che seguono metteranno a fuoco gli aspetti tecnologici con i loro vincoli e limitazioni – non si declina soltanto in una serie di scelte tecnologiche a basse o zero emissioni ma richiede interventi su **cinque assi principali di azione**:

1. potenziare i sistemi di trasporto sostenibili alternativi al trasporto su gomma e gestire la domanda e la struttura della mobilità;

⁵ B. Giechaskiel, J. Vanhanen, M. Väkevä & G. Martini (2017) *Investigation of vehicle exhaust sub-23 nm particle emissions*, *Aerosol Science and Technology*, 51:5, 626-641, DOI: [\[10.1080/02786826.2017.1286291\]](https://doi.org/10.1080/02786826.2017.1286291).

⁶ Selleri, T.; Melas, A.D.; Joshi, A.; Manara, D.; Perujo, A.; Suarez-Bertoa, R. *An Overview of Lean Exhaust deNO_x Aftertreatment Technologies and NO_x Emission Regulations in the European Union*. *Catalysts* 2021, 11, 404. [\[https://doi.org/10.3390/catal11030404\]](https://doi.org/10.3390/catal11030404), Suarez-Bertoa, R.; Pechout, M.; Vojtišek, M. and Astorga, C. (2020), *Regulated and Non-Regulated Emissions from Euro 6 Diesel, Gasoline and CNG Vehicles under Real-World Driving Conditions*, [\[https://doi.org/10.3390/atmos11020204\]](https://doi.org/10.3390/atmos11020204) e Suazer-Bertoa R.; Zardini A.A.; Astorga, C. (2014), *Ammonia exhaust emissions from spark ignition vehicles over the New European Driving Cycle*, [\[https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.07.050\]](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.07.050).

2. migliorare l'efficienza energetica e decarbonizzare i veicoli;
3. decarbonizzare i vettori energetici e i combustibili;
4. abbattere le emissioni necessarie alla produzione dei veicoli;
5. abbattere le emissioni necessarie alla costruzione di infrastrutture.

L'Italia ha un **sistema di trasporto che presenta una serie di deficit e distorsioni strutturali** che vanno corretti e che devono essere affrontati insieme, a causa delle loro profonde interrelazioni. Ad esempio, siamo tra i Paesi europei con il maggior numero di autovetture per abitante (secondi soltanto al Lussemburgo), abbiamo un ritardo e un deficit nelle reti di trasporto pubblico locale e nel servizio che erogano, una forte disomogeneità territoriale nella disponibilità di infrastrutture e un'eccessiva prevalenza del trasporto su gomma rispetto ad altri mezzi meno inquinanti.

Il **Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR)**, accompagnato dalle programmazioni dei fondi di bilancio ordinario e della coesione, cerca di rispondere ad alcune di queste criticità, sostenendo l'avvio di una profonda riforma del sistema della mobilità verso la sostenibilità ambientale e l'equità sociale⁷. I vari progetti del PNRR mirano:

- ad aumentare la quota di trasporto pubblico locale con il rinnovo, il potenziamento e la decarbonizzazione della flotta di veicoli;
- a ridurre la domanda di trasporto inquinante, in particolare nelle città, con l'ausilio anche delle piste ciclabili, della micro-mobilità elettrica (biciclette, monopattini, ecc.) e dell'intermodalità;
- a facilitare la diffusione delle automobili elettriche per mezzo dello sviluppo di una rete pubblica di ricarica veloce;
- a spostare una quota significativa di trasporto passeggeri e merci dall'automobile e dall'aereo alla ferrovia, con l'estensione al Sud dell'alta velocità, il potenziamento delle connessioni trasversali e lo sviluppo e la digitalizzazione di *hub* logistici.

Il PNRR comprende anche attività sperimentali per l'utilizzo di idrogeno a basse emissioni sul ciclo di vita (come l'idrogeno "verde", prodotto dall'elettrolisi di elettricità da fonti rinnovabili) per le ferrovie periferiche non elettrificate e per il trasporto pesante su gomma. Come risultato finale, ci si propone una sostanziale riduzione al 2050 del parco di veicoli su gomma, la cui entità dipenderà dal successo delle politiche intraprese e da molti altri fattori, tra i quali l'impatto a lungo termine della pandemia, l'evoluzione dell'impiego delle nuove tecnologie di lavoro a distanza e i cambiamenti di valori e comportamenti individuali, in particolare nelle nuove generazioni.

Ferma restando l'importanza di interventi di gestione della mobilità per l'abbattimento delle emissioni, l'efficienza energetica e l'uso di materie prime nonché la gestione dei costi della transizione e l'equità sociale (prima azione della lista precedente, fondamentale anche per l'azione 5, ovvero la riduzione delle emissioni

⁷ Cfr. l'Allegato infrastrutture al Documento di Economia e Finanza 2021 [https://www.dt.mef.gov.it/modules/documenti_it/...].

legate alla costruzione di infrastrutture), **il tema centrale affrontato in questo documento è relativo alla scelta delle migliori tecnologie di trasporto e dei migliori vettori energetici ai fini della decarbonizzazione del settore dei trasporti.** Ciò corrisponde alle azioni 2, 3 e 4 (migliorare l'efficienza energetica e decarbonizzare i veicoli, decarbonizzare i vettori energetici e i combustibili, abbattere le emissioni necessarie alla produzione dei veicoli), che risultano essere quelle più rilevanti per quanto riguarda gli impatti riconducibili in modo diretto ai veicoli e alle forme di energia per alimentarli.

L'obiettivo del Rapporto è quindi quello di fornire una base conoscitiva solida, fondata sullo stato dell'arte e della ricerca in corso, che permetta ai Ministeri competenti di sviluppare azioni e politiche efficienti per il raggiungimento degli obiettivi generali di riduzione delle emissioni, possibilmente con rapporti ottimali costi-benefici. Il documento non tratta invece degli aspetti relativi alla gestione della domanda di trasporto e la sua riorganizzazione. Non si parla, quindi, di trasporto pubblico locale, di *shift* modale, di logistica, di *Mobility as a Service* e di molti altri aspetti tecnologici e non tecnologici che riguardano il quadro generale del sistema della mobilità e delle infrastrutture. Tutti questi argomenti sono stati trattati nel Rapporto della Commissione "*Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili*" istituita nel 2021 dal Ministro delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, che costituisce la base di partenza di questo documento e che analizza in modo più esteso l'insieme delle misure economiche, tecnologiche, industriali, fiscali ecc. necessarie al conseguimento degli obiettivi di decarbonizzazione illustrati sopra (queste ultime saranno altresì oggetto di un altro documento di indirizzo, complementare al presente documento)⁸.

La decarbonizzazione dei mezzi di trasporto

La decarbonizzazione dei veicoli è uno dei fattori principali per conseguire nel modo più efficiente l'obiettivo di ridurre del 55% le emissioni di gas serra entro il 2030. Il motivo di questa affermazione deriva dalla bassa resa energetica (cioè della bassa conversione dell'energia del combustibile nel serbatoio in movimento alle ruote) degli attuali mezzi di trasporto su strada, che in condizioni operative presentano efficienze tra il 20% e il 25% per le automobili e un massimo del 30% per i camion su lunghe distanze. La sostituzione, in particolare dei mezzi meno efficienti e più inquinanti, con mezzi a zero emissioni allo scarico – tipicamente auto elettriche a batteria – comporta anche un notevole aumento di efficienza, dell'ordine del 300%. Questo fa sì che ogni unità di energia contenuta nei combustibili fossili sostituita da elettricità rinnovabile necessiti della produzione di un equivalente energetico di solo 0,25-0,3 unità di energia verde, con un forte guadagno in termini di emissioni e minori costi di esercizio, similmente alla sostituzione di caldaie a gas per riscaldamento con pompe di calore ad alta efficienza.

In altri termini, l'elettrificazione dei veicoli comporta una rilevante riduzione delle emissioni con una limitata realizzazione di nuove energie rinnovabili. Basti pensare che, **già con il mix energetico attuale, la sostituzione dei veicoli a**

⁸ Il Rapporto della Commissione contiene inoltre una dettagliata analisi degli impatti dei cambiamenti climatici su infrastrutture e trasporti in Italia, nonché una serie di proposte per aumentarne la resilienza.

combustione interna con veicoli elettrici comporterebbe per l'Italia la riduzione delle emissioni del trasporto leggero su strada del 50%.

Le **Tabelle 7 e 8** in Appendice contengono informazioni di carattere generale relative agli aspetti tecnologici, all'efficienza e alle emissioni di vari tipi di veicoli e relative ai differenti vettori energetici. Queste stesse informazioni sono riprese nelle sezioni successive per una discussione applicabile a ciascuna modalità di trasporto. Le Tabelle intendono fornire una visione comparativa tra diverse soluzioni tecnologiche e ad esse si rimanda per un approfondimento rispetto alla sintesi contenuta in questo primo capitolo.

In generale, anticipando alcune delle evidenze che verranno approfondite nel documento, si segnala che:

- **laddove possibili, le soluzioni basate sull'elettrificazione diretta (BEVs) sono chiaramente più competitive** dal punto di vista dell'efficienza energetica e della capacità di decarbonizzazione se l'elettricità è ottenuta a partire da fonti rinnovabili;
- **l'entità di questi vantaggi dipende dalla possibilità di produrre elettricità a zero emissioni di gas serra e a basso costo**, nonché dall'ottimizzazione e dalla qualità (**durabilità**) dei sistemi di stoccaggio energetico imbarcati (**le batterie**), che sono la componente più costosa di questo tipo di tecnologie;
- **gli automezzi a combustione interna (ICE) hanno un'impronta materiale complessivamente superiore a quelli a batteria** e ciò è rappresentato anche da maggiori emissioni sul ciclo di vita. Al termine della vita utile, infatti, un'auto ICE ha bruciato e convertito in gas dispersi in atmosfera una quantità di combustibile pari a 5-10 volte il suo peso (in funzione dei chilometri percorsi);
- **la parziale sostituzione dei combustibili convenzionali con biocombustibili porta a vantaggi marginali in termini di riduzione delle emissioni**, in quanto il profilo di emissioni dei biocombustibili, anche di seconda generazione, è comunque alto e comporta basse efficienze e notevoli costi energetici;
- **i combustibili sintetici non hanno un livello di sviluppo tecnologico vicino alla commercializzazione** e presentano anch'essi efficienze e costi energetici non ottimali che ne fanno prevedere un utilizzo futuro in particolare per il settore aeronautico e navale. Va comunque considerato che l'utilizzo di questi combustibili alternativi comporta comunque emissioni inquinanti nocive per la salute e per l'ambiente;
- **biometano, idrogeno, biocombustibili e combustibili sintetici saranno disponibili in quantità limitate**, a causa dei vincoli di disponibilità di biomasse sostenibili o di energia rinnovabile a basso costo. In un'ottica di ottimizzazione del sistema energetico del futuro, questi vettori energetici dovranno essere prioritariamente impiegati in utilizzi energetici e soluzioni di abbattimento delle emissioni per i quali non sono disponibili alternative tecnologiche a costi e impatti ambientali inferiori;
- **le batterie richiedono l'utilizzo di una serie di materiali**, alcuni metalli e grafite, i cui livelli di produzione attuali dovranno essere aumentati sostanzialmente (e in maniera sostenibile) per soddisfare una domanda di

batterie prevista in forte crescita. Questo può indurre cambiamenti strutturali importanti per le catene di approvvigionamento di materie prime, aumentando la domanda di alcuni metalli (es. litio, nichel, cobalto) e riducendo quella di combustibili fossili, con potenziali significative implicazioni di natura geopolitica;

- **i limiti delle tecnologie di elettrificazione diretta emergono in modo più evidente in casi in cui occorre un sistema di stoccaggio (una batteria) di grandi dimensioni.** Questo è il caso del **trasporto su lunghe distanze, specie per navi e/o aerei**, e quindi nei casi in cui non è possibile avere accesso a sistemi di approvvigionamento elettrico continuativo durante la fase operativa dei mezzi di trasporto;
- **altre limitazioni possono essere legate a squilibri tra domanda e approvvigionamento di elettricità**, il che potrebbe richiedere ulteriori sviluppi tecnologici e/o investimenti aggiuntivi che possono incrementare il costo totale della scelta dell'elettrificazione diretta rispetto a soluzioni alternative. Tuttavia, le esperienze di paesi Scandinavi, inclusa la Norvegia, che già oggi ha in circolazione circa il 20% di veicoli elettrici (ormai l'80% delle vendite di nuovi veicoli), dimostrano che il sistema elettrico, basato fortemente su energie rinnovabili (compreso eolico, variabile, e idroelettrico, pilotabile) al livello attuale di sostituzione non ha avuto ancora bisogno di sostanziali ristrutturazioni e potenziamenti;
- **le auto a batteria dovranno essere progressivamente incluse nei sistemi di regolazione della domanda**, necessari per aumentare l'*hosting capacity* delle reti elettriche verso produzione da rinnovabili. In tal senso sarà cruciale che i sistemi di ricarica per autoveicoli siano capaci, in futuro, di modulare il proprio carico a seconda dei segnali (anche di prezzo) che riceveranno dai gestori del sistema elettrico;
- **le alternative all'elettrificazione diretta richiedono l'uso di altri vettori energetici da decarbonizzare in maniera significativa** (per esempio idrogeno, ammoniaca o idrocarburi sintetici decarbonizzati) **e di propulsori capaci di convertirne l'energia contenuta in moto** (motori a combustione o celle a combustibile accoppiate con motori elettrici);
- **generalmente, la produzione di vettori energetici decarbonizzati è più energivora rispetto alla loro derivazione da energia fossile.** Nel caso dell'idrogeno, parte dello svantaggio legato alle perdite in fase di produzione – un elettrolizzatore per produrre idrogeno "verde" ha oggi un'efficienza media di circa il 65%, destinata a crescere in seguito all'innovazione tecnologica – è compensata da una migliore efficienza dei convertitori nei confronti dei motori a combustione. Le celle a combustibile, che trasformano l'idrogeno in energia elettrica per alimentare il motore elettrico del mezzo, hanno efficienze dell'ordine del 55% dell'energia in moto/lavoro utile, per una resa energetica complessiva del sistema dell'ordine del 35%, sempre assai inferiore a sistemi totalmente elettrici;
- **ulteriori svantaggi in termini di efficienza energetica si verificano con vettori energetici gassosi** dal momento che richiedono sistemi di stoccaggio ad alte pressioni e/o basse temperature per garantire sufficiente densità energetica a bordo di mezzi di trasporto. Per i vettori energetici gassosi, ulteriori costi sono associati al trasporto e alla distribuzione;

- **un altro fattore importante da tenere in considerazione nell'analisi dei costi** (anche in prospettiva futura) **è la scala produttiva**, dal momento che una produzione di vasta portata è generalmente associata a costi unitari inferiori per via di economie di scala, progresso tecnologico e riduzione del profilo di rischio. Non a caso, negli ultimi due decenni incrementi produttivi significativi si sono verificati principalmente per tecnologie legate ad energie rinnovabili (eolico, solare) e stoccaggio dell'elettricità (batterie). In quest'ultimo caso, gli sviluppi in scala sono in larga parte avvenuti grazie a un accresciuto interesse per applicazioni ad alto valore aggiunto (in particolare nell'elettronica e secondariamente nel comparto automobilistico);
- **la ricerca e lo sviluppo industriale di nuove tecnologie di batterie è oggi il principale settore strategico** che ha il potenziale di accelerare e ampliare la gamma di applicazioni dell'elettrificazione nei trasporti. Se oggi le migliori batterie impiegate nelle auto elettriche (tutte agli ioni di litio) hanno una densità energetica di circa 250 Wh/kg di peso, nei laboratori si stanno già sperimentando nuove soluzioni con densità energetiche più che raddoppiate che potrebbero arrivare sul mercato nel giro di 3-5 anni e con significativi miglioramenti nella domanda di materiali rari o critici⁹.

In sintesi, siamo all'inizio di una profonda rivoluzione del settore dei trasporti e della mobilità e questo documento cerca di dare una risposta anche al tema **della validità o meno in questa fase del principio di neutralità tecnologica**. Le brevi annotazioni di questa introduzione, che verranno sviluppate più in dettaglio nei capitoli seguenti, mettono infatti in luce notevoli differenze di efficienza, di profili emissivi di gas serra e di inquinanti, di costi, di disponibilità e prospettive tecnologiche. **Dobbiamo quindi domandarci se sia necessario, in nome della neutralità tecnologica, distribuire gli investimenti su tante soluzioni differenti, con il grande rischio di trovarsi a breve con infrastrutture inutilizzate e da mantenere.**

Le scelte, anche tecnologiche, vanno fatte sulla base di dati, confronti e valutazioni anche di carattere strategico. **La principale peculiarità delle decisioni deve essere quindi quella del "low regret"**, ovvero procedere con opzioni che comportino bassi rischi di insuccesso. Per fare un esempio, l'ampliamento della infrastruttura pubblica di ricarica per le auto elettriche ha sicuramente un bassissimo rischio di fallimento, così come la realizzazione di *gigafactories* per una produzione europea di batterie al top dello stato dell'arte. Similmente, la reintroduzione di incentivi per l'acquisto di auto elettriche – o di disincentivi per altre scelte – è un provvedimento utile a mobilitare un mercato ancora incerto e per avviare il percorso che ci deve portare al target di riduzione delle emissioni al 2030.

Altri investimenti quali, ad esempio, una eventuale rete di distribuzione dell'idrogeno per i trasporti, specialmente se effettuati con denaro pubblico in *deficit* o se pagati dai consumatori, vanno ben ponderati a causa dell'alto rischio di rivelarsi non necessari o competitivi rispetto ad altre opzioni tecnologiche. **Molte di queste scelte vanno poi condivise con i partner europei e con i Paesi confinanti**, per cercare

⁹ La Commissione europea definisce critici i materiali che sono strategicamente importanti per l'economia europea e il benessere dei cittadini che hanno un elevato rischio associato alla loro fornitura per ragioni tecniche (disponibilità fisica), geopolitiche o commerciali. La lista dei materiali critici stilata dalla Commissione europea contiene ad oggi 30 elementi/minerali. [\[https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/...\]](https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/...).

standard comuni e garantire una reciproca interoperabilità, ma ancora di più per creare insieme le nuove catene di valore che devono soddisfare la domanda della transizione ecologica.

Questi temi, oltre ad essere stati discussi nel Rapporto della Commissione "*Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili*" soprattutto per quanto riguarda le politiche infrastrutturali per la mitigazione e l'adattamento ai cambiamenti climatici, saranno oggetto dell'analisi dei capitoli successivi che si concentreranno soprattutto sugli aspetti tecnologici.



2. Decarbonizzare il trasporto stradale

Parco circolante e tecnologie disponibili

Il parco circolante italiano su strada ammonta a 52,7 milioni di veicoli¹⁰, comprendenti 39,8 milioni di autovetture, 7,2 milioni di motocicli, 3,7 milioni di veicoli commerciali leggeri, 0,7 milioni di mezzi pesanti per il trasporto merci, 0,1 milioni di autobus, oltre a 0,2 milioni di motocarri e 0,9 milioni di veicoli speciali. Il trasporto stradale italiano è basato per oltre il 99% su **motori a combustione interna** (ICEs, *Internal Combustion Engines*), alimentati da benzina, gasolio, gas petrolio liquefatto (GPL) e gas naturale (metano) compresso (CNG, *Compressed Natural Gas*). Nel caso del gasolio, circa il 5% della domanda energetica per mobilità su gomma è costituito da biocombustibili. Il resto, come anche la benzina e il GPL, sono derivati dalla raffinazione di petrolio fossile^{11,12}. Gli ICE sono connotati da efficienze energetiche basse, dell'ordine del 20-25% in condizioni tipiche di guida su strada, caratterizzate da una netta prevalenza di viaggi brevi (< 60 km/giorno).

Le principali alternative alle motorizzazioni ICE tradizionali sono **veicoli ibridi** dotati sia di un motore termico che elettrico, con una batteria che si ricarica solo in fase di decelerazione e frenata (HEV - *hybrid electric vehicle*), **ibridi ricaricabili** simili agli HEV ma con la batteria direttamente ricaricabile alla presa (PHEV - *plug-in hybrid electric vehicle*), **elettrici a batteria** (BEV - *battery electric vehicle*) ed elettrici **a celle a combustibile** (FCEV o HFCEV - (*hydrogen*) *fuel cell electric vehicle*).

Tecnicamente, i motori a combustione interna possono bruciare combustibili diversi rispetto alle miscele liquide della benzina o del gasolio (es. gas naturale, biocombustibili, combustibili sintetici e idrogeno) ma ciò richiede modifiche per i sistemi di stoccaggio dell'energia (es. bombole), iniezione del combustibile e gestione degli scarichi in atmosfera. Per i combustibili gassosi, così come per l'elettricità, il cambiamento di vettore energetico richiede anche lo sviluppo di un sistema di trasporto, distribuzione e stoccaggio dell'energia. Inoltre, è necessario che l'energia necessaria per i trasporti

¹⁰ [<https://www.anfia.it/it/automobile-in-cifre/...>], [<http://www.opv.aci.it/...>].

¹¹ Gestore dei Servizi Energetici (2020), *Energia nel settore trasporti – 2005-2019*, [[link](#)].

¹² Tecnicamente, anche la benzina può essere miscelata a biocarburanti e lo stesso vale per il metano (con il biogas). I volumi di biocombustibili attualmente in uso in Italia per i trasporti, in base ai dati GSE, sono però sostanzialmente trascurabili.

(come per gli altri usi finali) si sposti progressivamente verso vettori decarbonizzati e comprenda adeguati sistemi di stoccaggio. In ogni caso, indipendentemente dal combustibile i motori ICE sono mediamente 3-4 volte meno efficienti dei motori elettrici, e – come già messo in evidenza nel Capitolo 1 – producono diversi inquinanti atmosferici che causano danni alla salute.

Automobili

Veicoli elettrici: BEV

Si è ormai consolidato un largo consenso sul fatto che **la soluzione più rapida ed efficace per la decarbonizzazione sia l'automobile a batteria (BEV)**. Ciò è legato non solo alla maggiore efficienza intrinseca della propulsione, ma anche alla capacità di abbattimento delle emissioni sul ciclo di vita¹³ e, in prospettiva, alle opportunità di integrazione delle BEV nelle reti elettriche intelligenti grazie alle tecnologie digitali.

Uno dei fattori attualmente limitanti per la transizione all'elettrico è il prezzo di acquisto. Per una BEV di media taglia e in assenza di incentivi, il prezzo è superiore del 30% (circa 10.000 €) a una equivalente ICEV diesel o ibrida e fino al 50%, rispetto a una ICEV a benzina¹⁴. Le differenze di prezzo dipendono fortemente delle dimensioni del veicolo e sono più marcate per le vetture piccole, dove il costo della batteria incide maggiormente. Per le auto di lusso il differenziale è ormai molto ridotto, se non quasi azzerato.

Tuttavia, **il costo totale di possesso e utilizzo (Total Cost of Ownership, TCO) per km percorso (che comprende deprezzamento, rifornimento, manutenzione, ecc.) è già oggi più basso per i BEVs con profili di utilizzo intensivi¹⁵**, a condizione che i prezzi dell'elettricità (e il differenziale con i prezzi dei carburanti) non siano soggetti a incrementi che vadano ben al di là delle condizioni che li hanno caratterizzati in passato^{16,17}. In presenza di incentivi, il gap si chiude anche per profili di utilizzo

¹³ Bieker (2021), *A global comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of combustion engine and electric passenger cars*, [[https://theicct.org/...](https://theicct.org/)] e Hill, N., Amaral, S., Morgan-Price, S., et al. (2020), *Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fuelled vehicles through LCA : final report* [<https://data.europa.eu/doi/10.2834/91418>]. Quest'ultimo è stato sviluppato nel 2020 da Ricardo Energy & Environment per conto della Commissione Europea (DG CLIMA). V. anche *infra* Cap. 6

¹⁴ IEA and ICCT (2019), *Fuel economy in major car markets: technology and policy drivers 2005-2017*, [[https://www.globalfueleconomy.org/...](https://www.globalfueleconomy.org/)], [[https://www.transportenvironment.org/...](https://www.transportenvironment.org/)]

¹⁵ IEA (2018), *Global EV Outlook 2018 – 3 million and counting*, [[https://www.iea.org/...](https://www.iea.org/)]; Leaseplan (2021) *Car Cost Index 2021* [[https://www.leaseplan.com/...](https://www.leaseplan.com/)]. Quest'ultimo è pubblicato da una delle principali società di leasing di veicoli su scala globale.

¹⁶ Questo è accaduto di recente con l'incremento dei prezzi del gas, un problema il cui impatto sul settore elettrico può essere mitigato da investimenti sulla generazione da fonti rinnovabili e/o da revisioni delle regole di mercato che determinano la formazione dei prezzi.

¹⁷ Considerazioni analoghe possono essere fatte per i materiali necessari alla produzione di batterie, benché l'incremento dei prezzi incida solo per una parte del costo di produzione. Gli effetti negativi sulla competitività economica dei veicoli a batteria sono mitigati se gli aumenti di prezzo riguardano anche il petrolio ed i prodotti petroliferi. La recente invasione dell'Ucraina da parte della Russia è stata un elemento che ha portato a significativi aumenti dei costi di tutte le materie prime.

comparabili ai valori medi europei¹⁸. Miglioramenti nel design e riduzioni dei costi di produzione delle batterie sono ulteriori fattori chiave per il raggiungimento della parità di costo in assenza di incentivi prima del 2030¹⁹. **Ciò indica che i BEVs sono nella condizione di emergere come tecnologia ad alto tasso di adozione sul mercato**, con impatti importanti per il sistema industriale, di incremento dell'efficienza energetica e abbattimento delle emissioni. Per il raggiungimento di questi obiettivi, questa tipologia di veicoli va però ancora supportata attraverso adeguate politiche.

Altri fattori da considerare per l'elettrificazione riguardano:

- la transizione tecnologica connessa, con i relativi impatti per la filiera produttiva legata a ICEV;
- l'incremento della domanda di materie prime diverse da quelle attualmente usate nel settore *automotive*.

Questi aspetti richiedono politiche pubbliche adeguate alle sfide in atto: un esempio virtuoso in questo senso è dato dalla *European Battery Alliance*, che ha l'obiettivo di sviluppare e consolidare in Europa una filiera industriale avanzata sugli accumulatori, e dalla *European Raw Materials Alliance*, finalizzata allo sviluppo di catene di approvvigionamento resilienti per le materie prime necessarie alle batterie e altre tecnologie innovative e sostenibili²⁰. Un altro aspetto da governare è l'impatto della transizione verso l'elettrico o altri vettori energetici decarbonizzati sulla riduzione delle entrate fiscali derivanti dalle accise sui combustibili tradizionali. In questo ambito occorrono soluzioni innovative come, ad esempio, **la rimodulazione delle tasse automobilistiche in relazione all'utilizzo delle infrastrutture e alle distanze percorse**, a complemento della tassazione del carbonio per i combustibili fossili.

Un altro aspetto attualmente limitante è una inadeguata presenza di punti di ricarica, sia in ambito privato che pubblico. Per questo motivo, risulta **urgente sviluppare l'offerta di stazioni a media e bassa potenza** (3-22 kW AC) nei luoghi dove le auto sono parcheggiate per tempi lunghi (garage residenziali e pubblici, luoghi di lavoro, luoghi di svago, centri commerciali) **e di elevata potenza** (ricariche veloci da 50 kW e ultraveloci > 100 kW, DC) sulla rete autostradale e sulle strade di grande comunicazione (o in zone limitrofe e facilmente connesse a queste reti). **Un collo di bottiglia importante si profila nelle periferie o nei centri storici delle grandi città, dove spesso le abitazioni non sono dotate di garage privati.** Qui occorrono soluzioni innovative come, ad esempio, l'utilizzo dei pali della illuminazione pubblica – presenti ovunque lungo le strade – per ospitare prese di ricarica, in combinazione con nuove politiche di gestione della mobilità capaci di migliorare l'offerta di opzioni multimodali basate su trasporto pubblico e condiviso, anche grazie a micro-mobilità e tecnologie digitali.

¹⁸ Leaseplan (2019), *Total cost of ownership of EVs*, [<https://www.leaseplan.com/en-ix/blog/tco/tco-ev>], ElementEnergy (2021), *Electric Cars: Calculating the Total Cost of Ownership for Consumers*, [<https://www.beuc.eu/publications/...>].

¹⁹ BNEF (2021), *Hitting the EV inflection point*, [<https://www.transportenvironment.org/...>], IEA (2018), *Global EV Outlook 2018 – 3 million and counting*, [<https://www.iea.org/reports/...>], Mock and Diaz (2021), *Pathways to decarbonization: the European passenger car market in the years 2021–2035*, [<https://theicct.org/sites/default/...>], IHS Markit (2021), *Pivoting to an Electrified Future – The Automotive Industry Amps Up*, [<https://cdn.ihsmarkit.com/www/...>].

²⁰ [<https://ec.europa.eu/growth/industry/...>], [<https://ec.europa.eu/growth/industry/...>].

Un'infrastruttura di ricarica elettrica può essere velocemente installata in modo progressivo e modulare, riducendo il profilo di rischio per l'investitore. In questo modo è possibile mobilitare maggiori capitali privati rispetto ad altre soluzioni tecnologiche come l'idrogeno, dove la modularità non è un'opzione facilmente percorribile. Le stazioni di ricarica possono essere anche uno degli impieghi vantaggiosi dell'energia per le nuove **comunità energetiche**, contribuendo alla riduzione dei costi per i membri delle comunità.

Ibridi: PHEV e HEV

La tecnologia PHEV (*Plug-in Hybrid Electric Vehicle*) **può essere una soluzione interessante per la transizione**, a condizione che l'utilizzo elettrico possa essere massimizzato in ambito cittadino, abbattendo le emissioni inquinanti nei luoghi più densamente popolati, in aggiunta all'abbattimento delle emissioni di CO₂. **In Italia, circa il 75% delle auto percorre meno di 60 km al giorno ed il 90% meno di 100 km**, in linea con altre nazioni europee²¹. Se le vetture PHEV di prossima generazione ("*extended range*") avranno un'autonomia elettrica di circa 100 km potranno operare più efficacemente sulla transizione; sarebbe poi interessante applicare un sistema d'incentivazione per l'acquisto legato al *range* di autonomia elettrica e, per la tassa di circolazione, alla percentuale di uso elettrico.

I PHEVs sono molto meno impattanti sulla transizione industriale (non necessitano la rimozione del motore a combustione) e montano batterie più piccole dei BEVs (minor peso sulle catene di approvvigionamento). Possono quindi essere una soluzione di transizione efficace se hanno facile accesso a punti di ricarica (per esempio a casa e/o al lavoro). Dal momento che richiedono tutta la componentistica sia dei motori a combustione che dei motori elettrici, hanno un impatto emissivo in fase di costruzione più elevato di ICEVs e HEVs e un maggior costo di manutenzione per il proprietario rispetto ai BEVs.

I veicoli PHEV sono una forma evoluta della tecnologia ibrida (HEV – *Hybrid Electric Vehicles*). Al contrario dei PHEVs, **gli ibridi HEVs non permettono l'accesso a vettori energetici diversi rispetto ai combustibili usati anche nei veicoli ICE tradizionali**. I vantaggi offerti dagli ibridi HEVs rispetto ad ICEVs sono quindi limitati a un miglioramento dell'efficienza energetica, che si accompagna a una riduzione delle emissioni di gas serra. In termini quantitativi, questo vantaggio è dell'ordine del 20-25% rispetto a veicoli a benzina e vicino al 5% se paragonato a veicoli diesel, a parità di dimensioni e prestazioni. Una parte consistente di questo vantaggio, tuttavia, rischia di essere ridotta dal fatto che le tecnologie capaci di migliorare l'efficienza sono state usate per aumentare dimensioni e prestazioni delle auto, con conseguente riduzione dei benefici effettivi per efficienza energetica e abbattimento delle emissioni. Questo indica che gli ibridi HEV possono avere un ruolo importante nell'immediato, ma mette anche in luce l'importanza di una rapida transizione verso i PHEVs e i BEVs per ottenere vantaggi più significativi, a patto però che l'utilizzo in modalità elettrica dei PHEVs sia al massimo della potenzialità. È stato infatti recentemente rilevato che le emissioni di CO₂

²¹ Paffumi et al. (2018), *Alternative utility factor versus the SAE J2841 standard method for PHEV and BEV applications*, [<https://doi.org/...>].

dei PHEV risultano nella pratica maggiori di quanto inizialmente stimato, sia per ragioni comportamentali (ricariche non frequenti) che ambientali²².

Idrogeno: FCEV e HICEV

I veicoli a idrogeno con cella combustibile (FCEV o HFCEV) sono a tutti gli effetti veicoli elettrici, dotati cioè di un motore elettrico e di una batteria (di dimensioni molto ridotte rispetto a una BEV). Il cuore del sistema è la cella a combustibile, un dispositivo che converte idrogeno molecolare (H₂, caricato in fase di rifornimento) e ossigeno (O₂, prelevato dall'aria) in elettricità, con concomitante produzione di calore e acqua. Attualmente vi sono pochissimi modelli di auto FCEV disponibili sul mercato, con una presenza non rilevante in strada in Italia e non solo, anche per la ridottissima presenza di distributori di idrogeno sulla rete stradale²³.

In linea di principio è possibile utilizzare H₂ in motori a combustione interna (HICEV, *hydrogen internal combustion Engine vehicle*) analogamente al metano. Questo tipo di veicoli è studiato da decenni a livello prototipale ma non ha mai raggiunto la fase di commercializzazione.

Per essere efficaci dal punto di vista della decarbonizzazione, tutti i veicoli a idrogeno richiedono lo sviluppo di una grande capacità produttiva di idrogeno decarbonizzato²⁴ che – come previsto dalla Strategia europea sull'idrogeno – significa essenzialmente idrogeno “verde”, cioè prodotto da elettricità rinnovabile²⁵. In aggiunta, per raggiungere una competitività economica, i FCEVs necessitano di un vasto incremento produttivo delle celle a combustibile a livello globale, che al momento è difficile giustificare su basi economiche.

L'idrogeno richiede anche lo sviluppo di un sistema di trasporto e distribuzione capillare dedicato. Non risulta infatti realistica la possibilità di utilizzare la rete

²² ICCT (2021), *Plug-in hybrid vehicle CO2 emissions: how they are affected by ambient conditions and driver mode selection*, [<https://theicct.org/publication/...>].

²³ [<https://h2.live/en/>].

²⁴ È importante ricordare che la produzione attuale di idrogeno, usata in larghissima parte per la chimica (raffinerie, fertilizzanti) e nell'industria (alcune forme di produzione di acciaio), è basata per la quasi totalità su combustibili fossili (76% gas naturale, che porta a idrogeno generalmente denominato “grigio”, 23% carbone, per idrogeno “nero”, prodotto essenzialmente in Cina) ed è associata ad emissioni di gas serra significative. Fonte: IEA (2019), *The future of hydrogen*, [<https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>].

²⁵ Un'altra opzione per la produzione di idrogeno e – indirettamente, sebbene infrequente e complessa – di idrocarburi sintetici è legata al gas naturale fossile con abbattimento delle emissioni di gas serra. In questi casi, si parla di idrogeno “blu” (che richiede il sequestro geologico della CO₂ con alta efficacia), o “turchese” (basato sulla pirolisi del metano, con carbonio polverizzato come co-prodotto). Benché tecnicamente fattibili, queste forme di produzione di idrogeno restano ancora da dimostrare su scala industriale. Entrambe le filiere hanno un profilo economico soggetto a perdite di competitività con prezzi elevati del gas, come in questa fase. Lo stoccaggio geologico della CO₂, necessario per l'idrogeno “blu”, richiede un prezzo del carbonio che ne giustifichi il costo o un quadro regolatorio che lo renda necessario. In assenza di un prezzo del carbonio, il valore dello stoccaggio geologico può anche essere finanziato dai profitti realizzati con l'estrazione di idrocarburi fossili. Questa è una soluzione preferibile anche per lo sviluppo della tecnologia, specie rispetto al finanziamento pubblico. La produzione di carbonio polverizzato come co-prodotto dell'idrogeno “turchese” necessita la disponibilità di mercati capaci di assorbirla, specie se sviluppata su larga scala. Una ulteriore opzione è la produzione di idrogeno da elettricità nucleare (idrogeno “giallo” o “rosa”), attraverso l'elettrolisi.

esistente dei metanodotti, non solo perché richiederebbe costi di adeguamento molto elevati (su materiali delle condotte, compressori, valvole...), ma soprattutto perché occorrerebbe adattare in anticipo e in tempi molto brevi – per renderle pronte e certificate al nuovo combustibile nel momento in cui questo venisse erogato in rete – l'intera filiera del consumo di gas su decine di milioni di utenze, cosa che appare impraticabile non solo in termini di fattibilità temporale, ma anche dal punto di vista dei costi. Altre soluzioni per il trasporto di idrogeno sono comunque complesse ed economicamente giustificabili solo per impianti di grandi dimensioni (come impianti chimici, di produzione di combustibili, acciaierie a basse emissioni), non tanto per i mezzi di trasporto²⁶.

Le efficienze energetiche dei veicoli a idrogeno sono molto basse. Automezzi HICEV avrebbero un'efficienza analoga o inferiore a quelli che utilizzano combustibili tradizionali, mentre i FCEV richiedono due processi di trasformazione energetica (produzione di H₂ in elettrolizzatore e la sua conversione a elettricità in *fuel cell*) e uno di compressione di H₂ a 700 bar, per renderne lo stoccaggio a bordo compatibile con i volumi di un automezzo. Questo rende impari il confronto in efficienza rispetto ai veicoli BEV, come illustrato nella Figura 1.

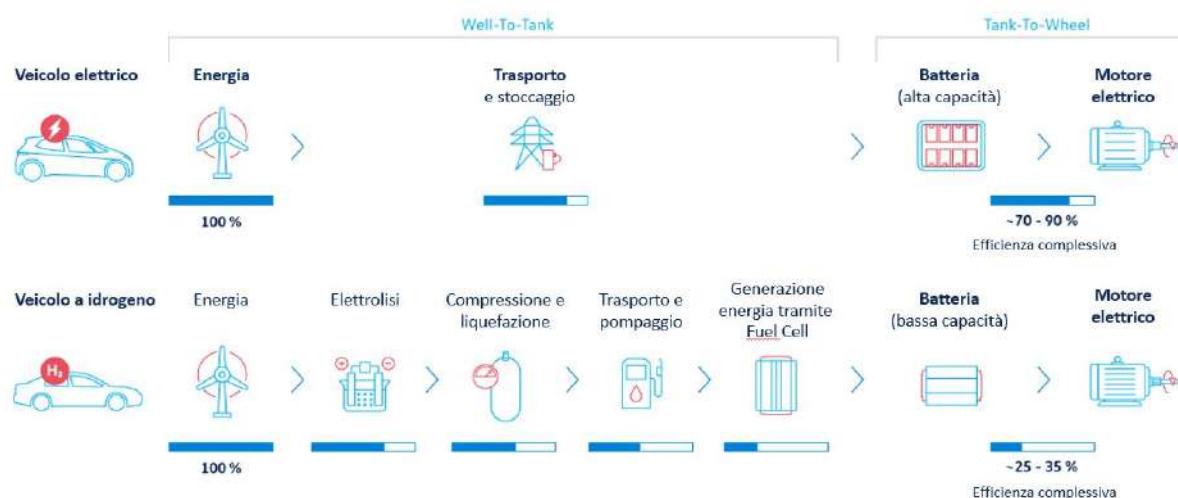
In termini di costi è difficile prevedere una competizione efficace dei veicoli a idrogeno con i BEV per almeno tre motivi:

1. un'auto FCEV è **intrinsecamente molto complessa**. Per muoversi richiede: cella a combustibile, motore elettrico, bombole, batteria, sistema di captazione e purificazione dell'ossigeno dall'ambiente esterno. Al confronto, una BEV è un sistema più semplice con una grande batteria connessa a un motore elettrico e nessun prelievo dall'esterno;
2. **il costo dell'idrogeno** prodotto con l'elettricità **non potrà mai essere competitivo rispetto all'uso diretto** di quella stessa elettricità in una batteria. Se l'elettricità costasse meno (cosa possibile se prodotta in periodi del giorno e/o della settimana di domanda bassa), il minor costo dovrebbe compensare le differenze in perdite energetiche per trasporto, distribuzione e uso²⁷;
3. l'investimento in stazioni di rifornimento a idrogeno (e sistemi di trasporto, distribuzione e stoccaggio, per produzione centralizzata) è **soggetto a profili di rischio molto più alti rispetto alle stazioni di ricarica elettriche** per via delle minori opportunità di sviluppo modulare, legato a probabilità più alte di sottoutilizzo rispetto a stazioni per la ricarica elettrica.

²⁶ Un'altra opzione per trasportare idrogeno è quella di "stoccarlo" in vettori liquidi che ne siano ricchi (LHOC, *Liquid Organic Hydrogen Carriers*) per poi estrarlo quando serve. Il LHOC più semplice e studiato è l'ammoniaca (NH₃), che permetterebbe di stoccare (indirettamente) idrogeno in forma liquida a temperature nettamente superiori rispetto all'idrogeno molecolare (-33 °C rispetto a -252 °C). L'ammoniaca stessa è una sostanza altamente corrosiva che richiede protocolli molto rigidi di trasporto e stoccaggio, tali da renderla inutilizzabile per il trasporto stradale, ferroviario o aereo (ma potenzialmente interessante per applicazioni navali, come discusso nel seguito). Lo stesso vale per altri LOHC, dal momento che la loro conversione in idrogeno richiede impianti con una scala tale da non poter essere applicata a bordo di mezzi di trasporto.

²⁷ Altre differenze sono legate al costo di capitale (il deprezzamento del veicolo, comprese pile a combustibile e/o batterie).

Figura 1: Confronto efficienza veicoli elettrici e idrogeno Well-To-Tank e Tank-To-Wheel. Rielaborazione basata su infografica Volkswagen - [\[Link\]](#)



La necessità di materie prime è significativa anche per i veicoli FCEVs, in particolare per la produzione delle celle a combustibile che richiedono, tra gli altri, elementi chimici del gruppo del platino (PGM, Platinum Group Metals), che sono estremamente rari e costosi. Soluzioni HICEV non migliorerebbero, e potrebbero persino peggiorare in assenza di adeguati accorgimenti, le emissioni di ossidi di azoto (NO_x) da parte degli automezzi, poiché la temperatura di combustione di H₂ è molto elevata e i processi di combustione dei motori termici utilizzano aria (78% azoto) e non ossigeno puro²⁸.

Per le ragioni qui elencate, l'idrogeno non appare un'opzione prioritaria (in termini di commercializzazione) nel caso dei veicoli leggeri su strada, almeno nel prossimo decennio e probabilmente anche oltre. L'idrogeno potrà giocare un ruolo rilevante solo nel caso si manifestino barriere importanti alla scalabilità dell'elettrificazione diretta, come l'indisponibilità di batterie o un inadeguato sviluppo delle reti di ricarica. Per questa ragione, anche al fine di poter monitorare l'evoluzione dei costi tecnologici, **l'idrogeno va comunque perseguito come opzione di ricerca.** Laddove le attività di ricerca si rivelassero capaci di abbattere costi di produzione in forme decarbonizzate ed efficienti in termini di risorse ed energia, nonché costi di trasporto e distribuzione, migliorandone anche il profilo di competitività economica, esse consentirebbero di avere maggiore capacità di sfruttare future possibilità di sviluppo.

Metano e biometano: GNC e LNG

Oltre il 70% delle automobili alimentate a metano nella UE sono immatricolate in Italia²⁹. Si tratta di automezzi a metano compresso (CNG, *Compressed Natural Gas*) dotati di

²⁸ Lewis, A. C. *Optimising air quality co-benefits in a hydrogen economy: a case for hydrogen-specific standards for NO_x emissions*. Environ Sci Atmospheres 1, 201–207 (2021). [\[https://pubs.rsc.org/en/...\]](https://pubs.rsc.org/en/...).

²⁹ [\[http://cngeurope.com/...\]](http://cngeurope.com/...).

bombole caricate sino a circa 220 bar. In anni recenti ha iniziato a svilupparsi una rete di distribuzione del gas naturale liquefatto (LNG, *Liquified Natural Gas*) per i mezzi pesanti (camion, autobus), con impianti di distribuzione centralizzati presso punti nodali della rete stradale o grandi parcheggi di mezzi pubblici. Per raggiungere lo stato liquido, il metano viene portato alla temperatura di -162 °C, con elevato consumo di energia.

L'uso del gas naturale³⁰ fossile non appare essere una soluzione compatibile con la prospettiva di decarbonizzazione per via di abbattimenti limitati delle emissioni dirette di gas serra dei veicoli ed emissioni fuggitive in fase estrattiva, di processo, trasporto e distribuzione con un significativo effetto forzante sul riscaldamento climatico, specie nel breve periodo, non ancora adeguatamente tracciato negli inventari internazionali³¹. Inoltre, a seguito della crisi internazionale legata all'Ucraina e alla possibile prospettiva di svincolarsi rapidamente dalle importazioni di gas proveniente dalla Federazione Russa, **sarà necessario identificare delle priorità di utilizzo del gas naturale, in particolare per utilizzi nel settore industriale e per il riscaldamento** (fino a quando quest'ultimo impiego non sarà rimpiazzato nella maggioranza dei casi da pompe di calore e teleriscaldamento).

Un'opzione decisamente più sostenibile risulta essere il metano di origine biologica. Residui agricoli, reflui zootecnici e fognari, frazione organica dei rifiuti urbani raccolti in modo differenziato sottoposti a un processo di degradazione a opera di batteri in assenza di ossigeno (digestione anaerobica), danno origine al cosiddetto biogas, una miscela di gas composta principalmente da metano (50-70%). Il biogas può a sua volta essere sottoposto a trattamenti di separazione per ottenere metano puro (biometano) che può essere immesso nella rete di distribuzione del gas naturale.

La quantità di biometano potenzialmente producibile in Italia è stimata (nelle valutazioni più ottimistiche) tra 6,5³² e 10³³ miliardi di m³ al 2030, a fronte di una produzione attuale di 1,7³⁴ miliardi di m³ - che rappresenta poco più del 2% della domanda totale attuale di metano, che ammonta a oltre 70 miliardi di m³/anno. **Economicamente, il biometano può essere interessante in caso di elevato utilizzo di infrastrutture esistenti e attualmente appare più razionale utilizzarlo per la decarbonizzazione di settori che non possono passare all'elettrificazione diretta in maniera semplice**, come gli impianti industriali che hanno bisogno di grandi quantità di calore (es. vetrerie, cementifici). Il biometano potrebbe anche rivelarsi essenziale come fonte di energia necessaria ad alimentare impianti di produzione elettrica (turbogas) in periodi dell'anno caratterizzati da insufficiente produzione di elettricità decarbonizzata, per via della natura variabile di fonti come eolico e solare.

Per questi motivi e per via del fatto che il mercato mondiale dell'auto ha avuto risposte limitate a tentativi di passaggio al metano come vettore energetico (mentre lo stesso mercato richiede un'armonizzazione tecnologica per poter garantire economie di scala), **è difficile giustificare investimenti in ulteriori punti di distribuzione e**

³⁰ Il gas naturale comunemente utilizzato è una miscela di composti gassosi nella quale il metano costituisce una frazione che va dall'80 all'99%, a seconda dei giacimenti di provenienza. Nel linguaggio corrente è spesso denominato semplicemente "metano".

³¹ UNEP (2021), *Global Methane Assessment: Benefits and Costs of Mitigating Methane Emissions*, [\[https://www.unep.org/resources/report/...\]](https://www.unep.org/resources/report/...).

³² [\[https://www.cng-mobility.ch/it/...\]](https://www.cng-mobility.ch/it/...).

³³ [\[https://www.biogasworld.com/...\]](https://www.biogasworld.com/...).

³⁴ [\[https://www.ilsole24ore.com/art/...\]](https://www.ilsole24ore.com/art/...).

stoccaggio di questo combustibile non fossile per l'uso nelle auto. Nel caso del biometano (soluzione che può sostituire progressivamente il metano fossile) occorre tenere presente anche l'importanza di preservare le risorse limitate per usi alternativi, nonché la differenza di costi che comporta una distribuzione dedicata al trasporto rispetto all'iniezione in rete o all'uso in prossimità delle unità di produzione. Va inoltre ribadito che biogas e biometano presentano un profilo emissivo potenzialmente non neutro a causa di possibili emissioni fuggitive.

Biocombustibili liquidi da colture dedicate

Partendo da colture dedicate è possibile ottenere, mediante processi di trasformazione industriale, combustibili liquidi e in particolare bioetanolo (per i motori a benzina, filiera *biochimica*) e biodiesel (per i motori diesel, filiera *oleochimica*). Questi combustibili possono essere utilizzati puri o in miscela con gli analoghi prodotti di derivazione fossile.

A livello internazionale le esperienze più consolidate sono la produzione di **bioetanolo** negli Stati Uniti (da mais) e in Brasile (da canna da zucchero) e di **biodiesel** in Indonesia (da olio di palma), Stati Uniti, Brasile e, in misura minore, Europa (da altri oli vegetali come l'olio di colza o di girasole). La produzione mondiale di biocombustibili liquidi ammonta a meno del 2% della produzione di petrolio ed è concentrata in alcuni grandi paesi delle Americhe e dell'Asia³⁵.

Il guadagno energetico netto del processo è talvolta messo in discussione, come la capacità di abbattimento delle emissioni sul ciclo di vita, a causa degli elevati consumi energetici nelle fasi iniziali della filiera (semina, fertilizzazione, irrigazione, raccolta, trasporto, produzione). L'efficienza è inoltre molto bassa: basti pensare che la produzione annuale di 1 m² di terreno coltivato a colza produrrebbe una quantità di bio-combustibile capace di muovere un'automobile media per 2 km, mentre l'energia prodotta in 1 anno da un pannello fotovoltaico della stessa superficie farebbe percorrere a un'equivalente automobile elettrica più di 900 km³⁶.

I biocombustibili da colture dedicate sono un'opzione sostenibile dal punto di vista energetico, economico e ambientale solo in contesti geografici e climatici limitati (es. alcune regioni del Brasile), e anche in questi casi possono ragionevolmente essere messi in discussione per via di effetti indiretti che possono portare alla deforestazione. **Tra i paesi con alto potenziale produttivo di colture per i biocombustibili non vi è certamente l'Europa e tantomeno l'Italia**, un Paese in carenza di terreni agricoli e, in prospettiva, con crescenti problemi di approvvigionamento idrico soprattutto al Sud. **Questa opzione sembra dunque da scartare, non solo per il trasporto su gomma.**

Biocombustibili liquidi da rifiuti (e altri di II generazione)

I biocombustibili derivati da prodotti di scarto (in particolare oli alimentari usati, grassi animali di scarto e altro) sono più efficaci per massimizzare l'abbattimento delle emissioni serra, ridurre gli impatti sui prezzi dei prodotti alimentari e il cambiamento nell'uso del suolo. Un discorso analogo si applica anche a biocombustibili derivati da materie prime contenenti cellulosa (come residui agricoli e prodotti derivati dalla

³⁵ BP, *Statistical Review of World Energy 2021*, [<https://www.bp.com/...>].

³⁶ Vedi l'esempio fatto a pag. 248 del libro *"Energia per l'astronave terra"* di Nicola Armaroli e Vincenzo Balzani, Zanichelli (terza edizione 2017).

gestione dei boschi), tecnicamente convertibile attraverso processi avanzati o di "seconda generazione" (come l'idrolisi enzimatica, da inquadrare nella filiera biochimica) o la gassificazione della biomassa, seguita da processi di sintesi e associabile anche all'uso di idrogeno decarbonizzato (filiera termochimica). Questi processi, tuttavia, sono attualmente soggetti a costi più alti rispetto alle filiere di prima generazione³⁷.

Le limitazioni relative alla disponibilità di materie prime sostenibili e ai costi, affiancate alla disponibilità dell'elettrificazione a costi competitivi per le auto, suggeriscono che anche **questo tipo di biocombustibili sia utilizzato con priorità in settori in cui non è fattibile un'analoga transizione all'elettrificazione diretta, come trasporto marittimo e aviazione**. Quest'assunzione resta valida nonostante i requisiti previsti dalla *Renewable Energy Directive* ne suggeriscano un uso parziale anche per il trasporto stradale. Tale opzione può essere infatti rilevante solo come soluzione di transizione di breve termine, data la presenza di capacità produttiva oggi disponibile in Italia in alcune bio-raffinerie, grazie a investimenti effettuati in anni recenti.

Idrocarburi sintetici

Si tratta di un termine oggi molto utilizzato per indicare generalmente combustibili liquidi o gassosi prodotti da fonti rinnovabili. Da un punto di vista chimico, i combustibili per motori sono costituiti da idrocarburi ed è quindi **necessario avere sorgenti sostenibili e convenienti sia di idrogeno che di carbonio per produrre combustibili sintetici**. In particolare:

- **Idrogeno.** L'idrogeno molecolare decarbonizzato si può usare in forma diretta per la produzione di combustibili sintetici. In generale, ciò dovrebbe preferibilmente accadere in luoghi prossimi alla sua produzione, per minimizzare i costi di trasporto e distribuzione, per cui sono necessarie reti dedicate o altre soluzioni complesse²⁶. Come già visto, in Europa l'idrogeno è oggi quasi esclusivamente prodotto da combustibili fossili (grigio). L'idrogeno verde da elettrolizzatori è una tecnologia consolidata, ma non ancora economicamente competitiva. Tutte le altre opzioni indicate in precedenza (si veda la nota 22) sono in fase di studio, ma non ancora implementate su scala industriale (idrogeno blu, turchese, giallo, rosa).
- **Carbonio.** La disponibilità di questo elemento è molto difficoltosa perché non esiste una materia prima facile da reperire e in grande abbondanza, come l'acqua per l'idrogeno. In linea di principio, la fonte di carbonio più abbondante è la CO₂ derivata dall'uso di carburanti fossili, che – se utilizzati per ottenere la materia prima per combustibili sintetici – generano comunque emissioni climalteranti. La maggiore sorgente di carbonio "biogenico" (o rinnovabile) a basso prezzo è costituita dai rifiuti organici che, come abbiamo visto, sono talvolta utilizzati per produrre biogas/biometano. Un'altra fonte di carbonio "rinnovabile" è la biomassa, che è però soggetta alle stesse limitazioni discusse nel caso dei biocombustibili e deve essere prioritariamente usata nei casi in cui l'elettrificazione diretta non sia economicamente fattibile. Una terza fonte potenziale di carbonio è l'atmosfera attraverso la cattura diretta della CO₂ (*Direct Air Capture*, o DAC), la quale è basata su tecnologie ancora non mature e

³⁷ Questo è un aspetto difficile da risolvere, per via di difficoltà tecniche, di scalabilità degli impianti e di valorizzazione di altri prodotti nella filiera del legno, che si associano a livelli di sviluppo tecnologico inferiori.

inevitabilmente molto energivore. Essa richiede energia decarbonizzata ed è soggetta a inevitabili limiti legati ai costi e alla necessità di installare grandi capacità produttive, che ne frenano lo sviluppo³⁸.

Anche la sintesi di combustibili liquidi da idrogeno e carbonio è complessa e di conseguenza onerosa in termini di taglia degli impianti, necessità di integrazione con altre fasi della produzione ed iniezioni di capitale da investire. La strada più pratica da intraprendere è il processo Fischer-Tropsch, introdotto circa un secolo fa, che, a partire da idrogeno (H₂) e monossido di carbonio (CO), permette di ottenere idrocarburi liquidi di varia composizione chimica (idrocarburi sintetici, appunto).

In tutti i casi, **la prospettiva di produrre idrocarburi sintetici è soggetta a barriere molto significative**. Questo li rende di difficile realizzazione su larga scala e ne limita la competitività economica, a meno di focalizzarne la produzione in zone ad alto potenziale di energia rinnovabile a basso costo (come, ad esempio, zone a elevato irraggiamento solare in Medio Oriente o Nord Africa) e la domanda su settori in cui la competizione dell'elettrificazione diretta è molto più difficile (il che, quindi, escluderebbe le auto e includerebbe piuttosto il settore navale e l'aviazione, come discusso in seguito).

In conclusione, **l'utilizzo di biocombustibili o combustibili sintetici nelle auto è meno efficiente da un punto di vista energetico, certamente più costoso e anche complessivamente più impattante rispetto all'elettrificazione diretta**. Inoltre, da un punto di vista dell'inquinamento atmosferico e dell'impatto sulla salute, il passaggio da combustibili di origine fossile a biocombustibili o combustibili sintetici non comporterebbe miglioramenti. La compensazione di emissioni di gas serra attraverso tecnologie di abbattimento delle emissioni e stoccaggio della CO₂ è anche inadeguata per la decarbonizzazione del trasporto su gomma, dal momento che esistono soluzioni capaci di decarbonizzare il settore con benefici netti anziché costi aggiuntivi.

Trasporto commerciale leggero

Le opzioni di decarbonizzazione dei veicoli commerciali leggeri sono del tutto analoghe a quelle relative alle auto, dal momento che i primi condividono con le seconde numerose analogie e soluzioni tecnologiche. Anche la dimensione delle batterie è analoga a quella delle auto (40-70 kWh)³⁹. L'elettrificazione diretta ha anche il vantaggio di offrire risparmi più significativi rispetto a soluzioni alternative trattandosi di veicoli con profili di utilizzo più intensivi rispetto alle auto. Ulteriori vantaggi possono derivare dalla possibilità di abbattere emissioni di inquinanti locali, specie in ambito urbano (*delivery* di ultimo miglio). Grandi aziende della distribuzione stanno già

³⁸ In questo contesto, esistono anche soluzioni che hanno solo valore temporaneo e non sono comunemente adottate: queste si basano sul riutilizzo di emissioni di CO₂ concentrate. Quelle oggi disponibili – quali gli scarichi in atmosfera da centrali termoelettriche o da combustione industriale di combustibili fossili – sono appunto composte da CO₂ fossile. La cattura e l'utilizzo di questo carbonio per la produzione di combustibili sintetici genererebbe comunque emissioni fossili, non compatibili in una prospettiva di progressiva decarbonizzazione. Purtroppo, le fonti di CO₂ di origine biogenica che permetterebbero di produrre combustibili decarbonizzati sono oggi piccole, relativamente alla potenziale domanda.

³⁹ ITF (2020), How Urban Delivery Vehicles can Boost Electric Mobility, [<https://www.itf-oecd.org/...>].

elettrificando le proprie flotte di consegna, mentre DHL produce addirittura in proprio i furgoni. All'estero, giganti della logistica come Amazon e UPS hanno investito in nuovi attori del settore automobilistico (es. Rivian, Arrival) per produrre veicoli commerciali leggeri. In Europa, diversi costruttori hanno iniziato a proporre versioni elettriche per questo tipo di veicoli.

Per le stesse ragioni, l'elettrificazione diretta è un'ipotesi tecnologica più interessante rispetto ai PHEVs, più che nelle auto private. Questo vale anche per taxi e auto condivise, anch'essi con profili di utilizzo i cui costi operativi pesano di più rispetto ai costi di capitale, se paragonati alle auto private.

L'utilizzo di veicoli commerciali BEV richiederà però un rafforzamento progressivo della rete elettrica, specie in prossimità di punti di ricarica di grandi flotte. Tuttavia, poiché la transizione delle flotte di veicoli commerciali è un processo di lunga durata, è possibile immaginare una distribuzione del costo di rafforzamento delle infrastrutture su un periodo prolungato, minimizzando il costo unitario.

Le tecnologie FCEV e idrogeno (anche HICEV) sono soggette alle stesse limitazioni discusse nel caso delle auto. Queste non sembrano rappresentare quindi una priorità per la transizione dei veicoli commerciali leggeri verso la decarbonizzazione, a meno che non vi sia la possibilità di abbattere i costi delle celle a combustibile o si renda disponibile idrogeno decarbonizzato a basso costo, da distribuire in stazioni ad alta frequenza d'uso, localizzabili in prossimità delle aree di stoccaggio dell'idrogeno stesso. Si tratta di sviluppi poco probabili e comunque localizzati, quindi difficilmente allineabili con una produzione di celle a combustibile su larga scala per abbattere i costi della tecnologia.

Sull'uso del metano valgono tutti i limiti indicati per le autovetture. Se di origine fossile, il metano non rappresenta una soluzione efficace per la decarbonizzazione.

La compensazione di emissioni di gas serra attraverso tecnologie di abbattimento delle emissioni e stoccaggio della CO₂ è inadeguata, così come l'uso di idrocarburi sintetici e di biocombustibili (in questi ultimi due casi fanno eccezione le necessità legate al rispetto della *Renewable Energy Directive*), anche per i veicoli commerciali leggeri dal momento che esistono soluzioni capaci di decarbonizzare il settore con benefici netti anziché costi aggiuntivi.

Trasporto commerciale pesante

Nel caso del trasporto pesante, l'uso intensivo suggerisce ancora una volta di dare priorità a soluzioni capaci di abbattere le emissioni di gas serra e di inquinanti locali con riduzioni nette dei costi operativi. Se però per le autovetture e il trasporto commerciale leggero l'elettrificazione appare essere l'opzione tecnologica preferibile dal punto di vista tecnico, ambientale ed economico, per quanto riguarda i trasporti commerciali pesanti, specialmente per le lunghe distanze, **le diverse alternative di riduzione delle emissioni sono di più complessa valutazione, anche per il forte impatto economico delle relative infrastrutture.**

Lo sviluppo significativo di veicoli BEV è già una priorità per molti costruttori tedeschi e del Nord Europa (es. Scania, Man, Daimler, Volvo e DAF) e ha un profilo di competitività particolarmente interessante per il trasporto merci in ambito urbano.

I principali fattori limitanti per il trasporto pesante BEV sulle lunghe distanze sono i seguenti:

- necessità di infrastrutture di ricarica ad altissima potenza per consentire rifornimenti veloci e di un sistema elettrico capace di gestire queste potenze in maniera efficiente e flessibile;
- necessità di contenere la taglia delle batterie, per evitare costi proibitivi.

Una soluzione che può permettere di gestire entrambi questi aspetti è resa possibile da **sistemi di strade elettrificate** (*electric road systems*, ERS), **in analogia con quello che succede per i treni**. La tecnologia allo stadio più avanzato di sviluppo è quella cosiddetta *a catenaria*, che è già stata sperimentata in progetti pilota in Svezia da Scania e Siemens ed è oggetto di ulteriori progetti pilota in Germania e in Inghilterra, con definizione di standard internazionali. L'idea è quella di **dotare la corsia destra delle autostrade di due linee elettriche sospese, che permettano l'alimentazione di un motore elettrico mediante un doppio pantografo**.

Una soluzione alternativa, attualmente oggetto di investimenti importanti da parte di Daimler, Scania e Volvo Trucks, è basata su una **rete di punti di ricarica ad altissima potenza** (è in corso di sviluppo lo standard a 1 MW) dedicata ai mezzi pesanti. Questa richiede capacità di stoccaggio elettrico stazionarie significative, anche per fare fronte a profili di domanda e richieste di potenza più difficili da allineare con l'offerta di produzione elettrica.

Un'ulteriore soluzione, sperimentata attualmente in Cina sui mezzi pesanti (dove è invece anche una realtà commerciale per le auto) è la **sostituzione veloce delle batterie alle stazioni di servizio** (*"battery swap"*). Questa soluzione comporta stazioni di servizio robotizzate in grado di rimuovere le batterie scariche e la sostituzione con pacchi di batterie ricaricate presso la stessa stazione. Dal punto di vista teorico, questa soluzione è quella che meglio avvicina una futura fermata alla stazione di servizio a quella attuale, con tempi di rifornimento dell'ordine dei 5-10 min⁴⁰. Dal punto di vista energetico, questa soluzione avrebbe il vantaggio di distribuire il carico sulla rete elettrica in modo molto più vantaggioso rispetto sia alle ricariche ad alta potenza, sia alle strade elettrificate che richiederebbero l'adeguamento della fornitura alla richiesta istantanea. Il *battery swap* richiede infatti per ciascuna stazione di sostituzione e ricarica potenze più basse e la possibilità di distribuire il carico lungo l'arco della giornata. Questa soluzione impatta **però con la difficoltà di trovare un accordo** tra diversi attori del mercato, non solo per quello che riguarda standard comuni relativi alle batterie (in quanto la diversa efficienza delle batterie potrebbe rappresentare un elemento di competitività tra i relativi costruttori), ma anche per quello che riguarda lo sviluppo di validi modelli di *business*.

I rapidi sviluppi nel campo delle batterie fanno oggi prevedere che **l'elettrificazione diretta possa imporsi più facilmente rispetto ad altre alternative, in particolare per quanto riguarda i trasporti urbani e regionali**. Le **soluzioni ibride PHEVs** potrebbero essere un'opzione "ponte" efficace, anche per abbattere emissioni di inquinanti locali in aree urbane e consentire comunque lunghe percorrenze, in attesa della disponibilità di infrastrutture di ricarica adeguate per i mezzi pesanti. La possibilità di *retrofit* di questa tipologia di veicoli per l'aggancio a strade elettrificate è interessante anche per facilitare l'adozione più rapida di sistemi ERS, riducendone il profilo di rischio. Un aspetto importante da considerare, anche in questo caso, è la necessità di **rafforzamento progressivo della rete elettrica e/o di incremento di**

⁴⁰ A.M. Vallera, P.M. Nunes, M.C. Brito (2021), [\[https://www.sciencedirect.com/...\]](https://www.sciencedirect.com/...).

capacità di stoccaggio stazionario distribuito, specie lungo le principali infrastrutture di trasporto su gomma (autostrade).

Le **tecnologie a idrogeno e fuel-cells (FCEV)** sono soggette a limitazioni simili a quelle discusse nel caso delle auto e in linea teorica non offrono la possibilità di abbattere i costi e migliorare l'efficienza energetica del sistema in maniera comparabile all'elettrificazione. A fronte di un'efficienza ridotta, l'idrogeno permette però rifornimenti più veloci rispetto all'elettricità, con possibili vantaggi in termini di tempo per percorrenze lunghe (anche se questi sono limitati da obblighi di pausa e riposo per i conduttori di mezzi pesanti, che potrebbero anche essere usati per la ricarica elettrica).

Altre applicazioni per l'idrogeno potrebbero emergere in **servizi di trasporto di tipo hub and spoke, che gravitano attorno ad una base logistica principale situata in prossimità di luoghi di produzione di idrogeno decarbonizzato**, grazie alla possibilità di limitare costi di trasporto dell'idrogeno stesso. In questi casi, i centri produttivi dovrebbero essere collocati lungo i principali assi europei di trasporto e la competitività economica sarebbe comunque soggetta alla condizione che i costi di produzione dell'idrogeno decarbonizzato si abbassino. In aggiunta a queste riduzioni di costi, il successo dell'idrogeno per il trasporto pesante richiede anche l'abbattimento dei costi delle celle a combustibile. Questo dipende dall'incremento della loro scala di produzione, uno sviluppo che non può essere sostenuto dal solo trasporto pesante e che non è attualmente previsto in altri settori.

Nonostante queste incerte prospettive, **l'idrogeno è preso in considerazione come soluzione da alcuni attori economici ed è attualmente incluso come opzione per la decarbonizzazione dei mezzi pesanti nell'Alternative Fuel Infrastructure Regulation proposta con il pacchetto Fit for 55**. Questa alternativa tecnologica si avvantaggia anche del fatto che non esistono attualmente né un accordo europeo per un sistema ERS transfrontaliero interoperabile, né progetti per stazioni di ricarica ad alta potenza elettrica, anche per via delle sfide che questi possono rappresentare per la rete. Tuttavia, essa **non sembra avere basi sufficientemente solide, specie nel prossimo decennio** se analizzata rispetto a metriche di efficienza energetica, capacità di decarbonizzazione (specie nel breve periodo) e competitività in termini di costi^{41,42}.

La **Tabella 1** propone una sintesi delle diverse opzioni tecnologiche oggi maggiormente considerate nel contesto europeo per la transizione energetica del trasporto merci su strada.

⁴¹ Come segnalato nel Cap. 2 con riferimento alle automobili, i principali elementi critici riguardano: i) le perdite energetiche nella catena di produzione, trasporto, distribuzione e lo stoccaggio di idrogeno; ii) la complessità di trasporto, distribuzione e stoccaggio dell'idrogeno e i relativi costi, specie in assenza della possibilità di condividere costi infrastrutturali con altri usi finali; ciò comporta che l'idrogeno venga oggi prodotto, principalmente da gas fossile – e quindi non in forma decarbonizzata – nei luoghi in cui se ne consumano volumi significativi, non quindi in casi di domanda distribuita; iii) le economie di scala necessarie per poter abbattere i costi unitari delle celle a combustibile, dipendenti da dinamiche di adozione sul mercato (anche per le auto) molto limitate.

⁴² Sebbene non si ritenga questa una tecnologia promettente per i settori di trasporto potenzialmente elettrificabili, va in ogni caso sottolineato che l'idrogeno decarbonizzato sarà essenziale per la transizione ecologica del settore industriale, in particolare per la produzione di fertilizzanti, altri prodotti chimici e per usi energetici come nella produzione di acciaio o in altre industrie "hard to abate".

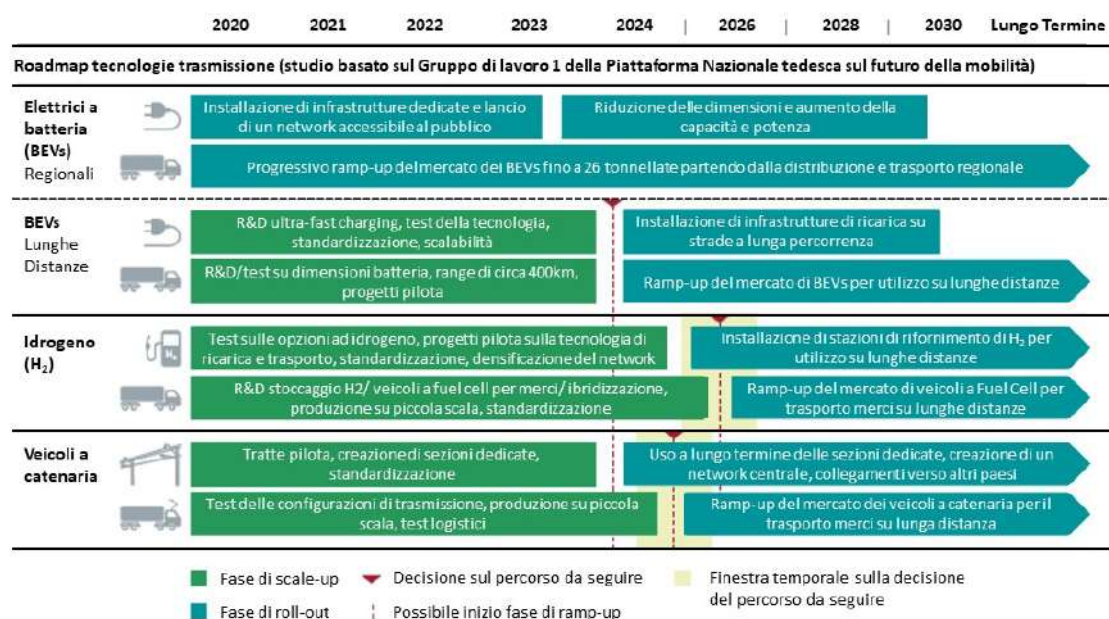
Tabella 1: Schema riassuntivo delle tecnologie oggi maggiormente considerate in Europa per la decarbonizzazione della mobilità merci su strada

Tecnologia	Pro	Contro	Stato attuale
Veicoli a idrogeno (FCEVs o ICEVs) Alimentazione: ingresso dell'idrogeno in serbatoi riforniti in stazioni autostradali o presso grandi depositi.	Tempo di rifornimento rapido, autonomia più lunga rispetto alle batterie attuali, flessibilità.	Costo alto dei veicoli FCEV, scarsa efficienza energetica (3x batteria o più, peggiore per ICEVs), assenza di produzione di idrogeno decarbonizzato, costi elevati anche per la sola produzione (a oggi), profilo di rischio alto legato alla competitività difficile da raggiungere, per diversi aspetti.	I veicoli FCEV attuali sono prototipi, ad esempio Hyundai Xcient è di 22 tonnellate (più rimorchio) con un'autonomia di 400 km. ICEV possono usare idrogeno e costano molto meno di FCEVs, ma hanno perdite di efficienza più alte.
Veicoli a batteria (BEVs) Batterie di bordo ricaricate durante la notte presso i depositi e stazioni di ricarica rapida. Possibilità di soluzioni basate su battery swapping.	Alta efficienza energetica, bassi costi operativi rispetto all'idrogeno e al diesel, possibilità concrete di accesso a un vettore energetico già significativamente decarbonizzato, compatibilità con altre infrastrutture EV. Possibilità di sviluppare sistemi basati su <i>battery swapping</i>.	Costo dei veicoli, peso delle batterie, tempi di ricarica più lunghi, autonomia limitata che richiede ricariche diurne ad altissima potenza (e accesso alle stazioni di ricarica), che può essere un limite per il profilo di decarbonizzazione della produzione elettrica (o richiedere stoccaggio stazionario, per via di difficoltà di gestione per la rete). <i>Battery swapping</i>, attualmente in fase sperimentale in Cina, è soggetto a rischi, specie con uno sviluppo rapido delle tecnologie delle batterie. La durabilità è anche in questione.	Veicoli attualmente in vendita commercialmente, ma in genere a costi ben superiori al diesel. Il più grande è il DAF CF Electric a 37 t con 250 km di autonomia.
Veicoli con motore elettrico alimentati da ricarica dinamica La ricarica elettrica dinamica richiede lo sviluppo di infrastrutture <i>electric road systems</i> (ERS), simile ai tram o treni. Batterie a bordo che consentono una certa distanza e libertà di movimento rispetto	Alta efficienza energetica, bassi costi operativi rispetto all'idrogeno e al diesel, possibilità concrete di accesso a un vettore energetico già significativamente decarbonizzato, impatto sulla domanda elettrica che è più facilmente gestibile (perché distribuito e non caratterizzato da altissime potenze di ricarica, puntuali e in finestre temporali ristrette). I veicoli possono essere prodotti con la capacità di <i>retrofit</i>.	Costo iniziale dell'infrastruttura ERS, che richiede alte frequenze d'uso per essere effettivamente ripagata, rischio di obsolescenza in caso di sviluppo estremamente rapido delle batterie e/o di sistemi di ricarica ad altissima potenza (e quindi anche soluzione delle difficoltà di gestione per la rete). Necessità di decisioni condivise sulla tecnologia specifica per garantire interoperabilità e sugli investimenti del <i>network</i> ERS (per esempio la rete TEN-T).	I veicoli attuali sono prototipi, prodotti da Scania con 40 tonnellate, ERS "illimitato" e autonomia e backup diesel.

all'infrastruttura ERS.			
-------------------------	--	--	--

La **Figura 2**, facendo riferimento al caso della Germania con riguardo al settore del trasporto merci su strada, mostra i tempi di sviluppo e l'assunzione di decisioni con approccio che, per via di necessità infrastrutturali diverse, è destinato a non essere più *technology neutral* nel corso del prossimo decennio.

Figura 2: Rielaborazione basata su roadmap decisionale relativa alle tecnologie di decarbonizzazione della mobilità merci su strada in Germania - [\[Link\]](#)



Sull'uso del gas naturale nel trasporto pesante valgono tutte le osservazioni fatte in precedenza per i veicoli leggeri⁴³. Al contrario di questi ultimi, invece, **l'uso di forme a basse emissioni di gas serra (biogas/biometano) può essere considerata un'ipotesi sia per le lunghe distanze che per servizi di trasporto hub and spoke** (che gravitano attorno ad una base logistica principale), specie come soluzione di transizione e in particolare in assenza di un'infrastruttura di accesso a elettricità o combustibili alternativi⁴⁴.

⁴³ Ricerche sul reale comportamento emissivo di camion equipaggiati con motori a CNG o LNG, che considerano anche le emissioni legate alla filiera del gas, mostrano che il vantaggio emissivo rispetto all'alimentazione diesel è in media assai ridotto (circa 10%) rispetto a valori molto più alti pubblicizzati dalle case costruttrici, ma nei casi peggiori possono risultare in emissioni molto superiori a quelle delle motorizzazioni diesel a causa di elevate emissioni di metano incombusto (Speirs et. Al, 2020 Prog. Energy 2 012002 <https://doi.org/10.1088/2516-1083/ab56af>).

⁴⁴ In alternativa, il biogas può essere una soluzione per decarbonizzare flotte che gravitano attorno a una stazione di rifornimento, ad esempio quelle dei mezzi di raccolta dei rifiuti, nel caso in cui la produzione di gas sia direttamente disponibile presso i siti di trattamento. Queste stesse flotte, tuttavia, sono in competizione per l'uso di elettricità e il biogas sarà probabilmente più importante da usare in siti di stoccaggio e in centrali termoelettriche, per periodi di bassa produzione di elettricità rinnovabile da altre fonti (in particolare solare e/o eolico).

Considerazioni analoghe a quelle espresse per le autovetture si applicano anche ai biocombustibili e agli idrocarburi sintetici. I biocombustibili, anche nel quadro del rispetto della *Renewable Energy Directive*, potranno rappresentare un'utile soluzione di transizione nel breve periodo, specie se usati in veicoli PHEVs e nella misura in cui siano capaci di effettivi abbattimenti di emissioni di gas serra e siano prodotti da filiere sostenibili. Nel medio-lungo periodo i biocombustibili saranno principalmente utilizzati per la decarbonizzazione del trasporto navale e aereo (settori in cui andranno prioritariamente utilizzati per assenza di alternative economicamente competitive). Il carbonio di origine biogenica sarà necessario anche in altri settori economici, come l'industria chimica, riducendo in tal modo la disponibilità in termini di volume per altri settori di trasporto. I combustibili sintetici non sono oggi ancora disponibili a costi competitivi, a causa di basse efficienze energetiche in fase di produzione; in ogni caso a causa delle limitazioni in termini di produzione avranno maggiore rilevanza nel trasporto aereo e navale.

La compensazione di emissioni di gas serra attraverso tecnologie di abbattimento delle emissioni e stoccaggio della CO₂ è anch'essa soggetta a un profilo di interesse limitato nel trasporto stradale (anche per i mezzi pesanti), dal momento che esistono soluzioni capaci di decarbonizzare il settore con benefici netti o costi inferiori.

Infrastrutture per la decarbonizzazione del trasporto pesante su lunghe distanze

Tutte le diverse tecnologie presentate per la decarbonizzazione del trasporto pesante necessitano di infrastrutture costose e complesse. Per questa ragione, le scelte relative allo sviluppo delle diverse tecnologie non possono prescindere da una valutazione tecnico-economica dei costi e dei vincoli infrastrutturali.

Partendo dall'opzione dei mezzi pesanti elettrici alimentati a batteria, bisogna considerare che le regole che disciplinano il settore richiedono una sosta di 45' ogni 4,5 ore di viaggio, corrispondente sulle autostrade della rete TEN-T a circa 400 km di percorrenza in pianura. **Le stazioni di ricarica dovrebbero pertanto assicurare che nei 45' di sosta un mezzo di 40 tonnellate recuperi l'autonomia necessaria a compiere un nuovo tratto di 4,5 ore di viaggio.** La proposta di regolamento AFIR presentata dalla Commissione europea nell'ambito del pacchetto *Fit for 55* prevede la realizzazione lungo gli assi del TEN-T di almeno una stazione di ricarica della potenza di 350 kW ogni 60 km in entrambe le direzioni. Sembra lecito il dubbio, sollevato da diversi Stati membri, che un tale sistema infrastrutturale non soddisfi le esigenze dei trasportatori in quanto incapace di ricaricare a sufficienza e che, di conseguenza, sarebbe utile attendere la disponibilità - prevista per il 2025 - del nuovo standard di ricarica da 1 MW. Peraltro, per queste potenze e per permettere che molti mezzi possano accedere contemporaneamente alle stazioni di ricarica, è necessario disporre di una **rete elettrica lungo le autostrade adeguata alle necessità**, a oggi non disponibile nella maggioranza dei casi.

Una rete rafforzata lungo le arterie autostradali sarebbe comunque necessaria, soprattutto in vista di una crescita futura, per implementare anche le altre soluzioni delineate. Tra queste, le infrastrutture di ricarica necessarie per i veicoli leggeri (auto e furgoni), le infrastrutture di ricarica ad alta potenza (1 MW) per i mezzi pesanti, le stazioni di *battery swap* e i sistemi di strade elettrificate (ERS) a catenaria, che richiedono allacciamenti alimentati da alta tensione e trasformatori regolarmente distribuiti lungo l'infrastruttura (per quanto la loro frequenza sia adattabile allo sviluppo

della domanda elettrica nel tempo, legato al numero di veicoli che usano l'infrastruttura).

Una disponibilità adeguata di elettricità è inoltre necessaria anche per la realizzazione di stazioni di rifornimento di idrogeno, che richiederebbe stazioni di produzione di idrogeno in prossimità dei punti di distribuzione⁴⁵. Queste sarebbero equipaggiate con elettrolizzatori e sistemi di stoccaggio a pressione, che andrebbero alimentati da energia elettrica decarbonizzata per ragioni di abbattimento di emissioni di gas serra e minimizzazione dei costi (nonostante le perdite di efficienza energetica rispetto all'elettrificazione diretta).

Pertanto, **una prima soluzione *low regret* è quella di realizzare una rete ad alta tensione a servizio dei grandi assi autostradali, procedendo in un secondo tempo alla realizzazione delle soluzioni che emergeranno come preferite dalla discussione a livello europeo.**

La complessità e i tempi di realizzazione di qualsiasi soluzione tecnologica e infrastrutturale decarbonizzata per il trasporto merci su lunghe distanze **renderebbe necessariamente più conveniente lo spostamento del trasporto delle merci su rotaia** tra grandi *hub* logistici regionali, dai quali avviare le merci alla distribuzione capillare entro ambiti chilometrici gestibili con mezzi elettrificati, anche attraverso tecnologie digitali per la gestione della logistica. Questo è in linea con la scelta, inclusa nel PNRR, di potenziare i trasporti ferroviari, che in Italia movimentano circa l'8% delle merci. Tuttavia, risulterebbe molto difficile (per via di necessità di grandi quantità per spedizioni e limitazioni in termini di capillarità della rete) che questa possa imporsi come sistema principale di trasporto delle merci.

Trasporto pubblico locale

Le tecnologie di decarbonizzazione dei veicoli per il trasporto pubblico locale, in particolare urbano, **sono del tutto analoghe a quelle per i veicoli leggeri e pesanti usati in ambito cittadino** e descritte in precedenza, centrate prevalentemente su **soluzioni elettriche a catenaria (filobus, tram, metropolitane) o a batteria**. In questo segmento, l'elettrificazione diretta ha costi operativi inferiori rispetto alle alternative, trattandosi di veicoli usati in maniera intensiva su percorsi limitati e prevedibili in ambito urbano. Inoltre, nonostante le necessità di adattamento e adeguamento alle norme antincendio, è possibile disporre di ampi spazi di parcheggio dedicati che risultano più facilmente dotabili di stazioni di ricarica a elevata potenza, da utilizzare tipicamente nelle ore notturne, cioè quando domanda sulla rete e costo dell'elettricità sono tendenzialmente ai minimi⁴⁶. In sviluppi recenti, la tendenza spiccata

⁴⁵ Fino a quando la produzione di idrogeno decarbonizzato non sarà economicamente competitiva e tale da consentirne un potenziale di utilizzo in volumi molto alti e per diversi usi finali, dal punto di vista economico non sembra proponibile la realizzazione di una rete dedicata al trasporto dell'idrogeno per la fornitura alle eventuali stazioni di ricarica. Gli elevati costi di trasporto e distribuzione di idrogeno, oltre alla necessità di abbattimento di costi di produzione di idrogeno decarbonizzato, mettono anche in evidenza rischi di "*stranded assets*" per l'infrastrutturazione dei principali assi trans-europei di stazioni per il rifornimento per mezzi pesanti, attualmente incluse nella proposta AFIR.

⁴⁶ Soluzioni che fanno affidamento a ricariche diurne (*opportunity charging*) possono avere maggiore rilevanza in casi in cui si verifichino surplus di produzione solare.

verso una transizione verso l'elettrico delle flotte di autobus urbane, visibile su scala europea e globale (quindi rilevante per il mercato di esportazione e non solo quello interno)⁴⁷ ha già iniziato a estendersi anche al trasporto pubblico regionale.⁴⁸

Dal momento che la transizione del trasporto pubblico locale è un fenomeno che richiede la sostituzione progressiva della flotta esistente, è possibile immaginare, analogamente ai veicoli commerciali, una distribuzione del potenziamento delle infrastrutture e del parco mezzi su un periodo prolungato, ammortizzando i costi. Inoltre, in una prospettiva di sviluppo di distretti locali di produzione, distribuzione e uso di idrogeno (**hydrogen valleys**) è possibile che, dopo il 2030, in alcuni contesti, vi sia la disponibilità di quantitativi consistenti di idrogeno da utilizzare in **autobus FCEV**, sempre che i costi di questi mezzi divengano nel frattempo competitivi⁴⁹.

Le soluzioni basate su combustibili liquidi alternativi non offrono la possibilità di abbattere i costi, di migliorare l'efficienza energetica del sistema in maniera comparabile alla elettrificazione e di migliorare l'inquinamento atmosferico urbano. Queste non dovrebbero quindi essere incoraggiate in un contesto di decarbonizzazione progressiva del trasporto pubblico locale, a meno che non vi siano fattori limitanti per l'elettrificazione diretta, ferme restando le necessità di rispettare le condizioni incluse nella *Renewable Energy Directive* e di dare maggiore priorità a trasporto marittimo e aviazione.

Motocicli

L'elettrificazione dei motocicli (due o tre ruote) è già una realtà commerciale molto diffusa in Cina, con centinaia di milioni di esemplari sulle strade da oltre un decennio e livelli di qualità e prestazioni crescenti. Altri mercati asiatici in crescita sono, tra gli altri, Taiwan, Vietnam e India. In alcuni di questi Paesi è stato implementato l'approccio *battery swapping* (es. il caso Gogoro a Taiwan) che si diffonde anche nella micro-mobilità, cioè monopattini e biciclette a pedalata assistita.

Il vantaggio principale dell'elettrificazione per veicoli così leggeri, da un lato è legato alla piccola taglia della batteria, che ne limita i costi, permette la ricarica in tempi brevi su prese normali reperibili ovunque e ne facilita la rimozione, dall'altro è dipendente dal fatto che **questa tecnologia risulta del tutto compatibile con la stragrande maggioranza degli utilizzi di questi veicoli, tipicamente urbani**. I motocicli hanno anche un impatto notevole sulla qualità dell'aria nei centri abitati, che

⁴⁷ ACEA (2022), *Fuel types of new buses: electric 10.6%, alternative fuels 10.5%, hybrid 10.1%, diesel 68.8% share in 2021*, [<https://www.acea.auto/...>] per le dinamiche di mercato in Europa, IEA (2021), *Global EV outlook 2021* [<https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>] per quelle globali.

⁴⁸ BYD (2022), *BYD Makes First Ever Delivery of eBuses to Bergkvarabuss in Sweden* [<https://bydeurope.com/article/404>] per le prime esperienze europee in ambito di trasporto pubblico regionale, in Svezia e VDL (2021), *The bus driver is also an indispensable link in the new generation of electric Citeas*, [<https://www.vdlbuscoach.com/en/news/...>] per lo sviluppo di modelli con autonomia fino a 600 km.

⁴⁹ A tale proposito va ricordato che l'abbattimento dei costi richiede un incremento della scala di produzione e quest'ultimo è difficile da ottenere, in un contesto in cui la combinazione FCEV e idrogeno decarbonizzato è soggetta a limiti strutturali in termini di competitività rispetto a soluzioni alternative, in particolare BEVs ed elettricità.

attraverso la trazione elettrica viene completamente azzerato. Come nel caso di altri veicoli, l'emergere di soluzioni commerciali per l'elettificazione dei motocicli presenta sinergie, specie in una fase iniziale, con la mobilità condivisa, grazie a profili di utilizzo più intensi, che beneficiano di costi operativi più bassi.



3. Decarbonizzare il trasporto ferroviario

Il quadro generale

Il settore ferroviario è la forma di mobilità caratterizzata dalle emissioni dirette più basse per unità di trasporto ed è anche quello già oggi più flessibile in termini di diversificazione energetica, specie grazie all'elettrificazione diretta. In prospettiva futura, **le tecnologie di decarbonizzazione dei treni rimangono in larga parte orientate verso l'elettrificazione diretta tramite sistemi con alimentazione a catenaria** e ciò vale in ogni contesto: trasporto urbano, interurbano, alta velocità e trasporto merci.

In Italia esistono ancora 5.000 km circa di linee secondarie non elettrificate (principalmente per il trasporto regionale su tratte poco frequentate), pari a poco meno del 30% della rete ferroviaria nazionale⁵⁰, attualmente servite da treni a gasolio. Ai fini della decarbonizzazione, per queste linee l'elettrificazione a catenaria è economicamente sostenibile solo se vi è una sufficiente frequenza d'uso e/o una concreta possibilità di incremento grazie a politiche di supporto all'uso delle ferrovie.

Nel 2019 il traffico ferroviario in Italia ha emesso 150 kton di gas serra, pari allo 0,03% delle emissioni nazionali complessive⁵¹.

Elettrificazione alternativa: fuel cell e batterie

Quando l'elettrificazione a catenaria non è percorribile, la sostituzione dei treni a gasolio può puntare su **elettrificazione a celle a combustibile o a batteria**.

L'utilizzo di treni elettrici alimentati con celle a combustibile a idrogeno è un'opzione che vede oggi le prime applicazioni commerciali in Germania (Brandeburgo) e Cina (Tangshan). Tale opzione è **soggetta a tutti i limiti** discussi nel caso del trasporto su strada, **in particolare l'elevato costo delle celle a combustibile e l'indisponibilità di idrogeno decarbonizzato a basso costo**. Per poter abbattere i

⁵⁰ RFI (n.d.), *La rete oggi*, [<https://www.rfi.it/it/rete/la-rete-oggi.html>].

⁵¹ ISPRA (2021), *Italian greenhouse gas inventory report 1990-2019 – National inventory report 2021*, [<https://www.isprambiente.gov.it/files2021...>].

costi di distribuzione e trasporto, l'idrogeno dovrebbe essere reso disponibile in stazioni ad alta frequenza d'uso e in prossimità dei siti di produzione.

In analogia con il trasporto pesante su gomma, laddove possibile **l'elettrificazione diretta tramite treni a batteria è una opzione preferibile** in termini di efficienza energetica e necessità infrastrutturali, quindi molto competitiva dal punto di vista economico. Quest'opzione è attualmente disponibile in applicazioni ferroviarie regionali entrate recentemente in funzione in Europa (in particolare in Germania), assieme a tram privi di catenaria (già introdotti in alcune città della Francia). La competitività economica è maggiore per convogli più piccoli che richiedono autonomie limitate fino a 200 km e possono avere accesso alla rete elettrica nelle stazioni, specie di inizio e/o fine delle tratte. La competitività dell'idrogeno è invece maggiore per convogli grandi che operano su distanze più lunghe e con limitato accesso alla rete elettrica, caso relativamente raro in Italia.

L'elettrificazione in tutte le sue forme è di gran lunga il principale obiettivo per la decarbonizzazione del trasporto ferroviario. Occorre quindi cooperare con l'industria per migliorare la capacità del sistema produttivo italiano di intercettare parti consistenti delle catene di valore legate a questo processo.

Metano e altre opzioni

Come per il trasporto su gomma, l'uso del gas naturale come combustibile alternativo nelle ferrovie è oggi – a seguito dell'impatto sui prezzi dovuto alle tensioni sui mercati di fine 2021 e alla crisi dell'Ucraina – soggetto ad un profilo di competitività economica ridimensionato. Sempre in analogia con altri modi di trasporto, il **metano non è una soluzione efficace per la decarbonizzazione ferroviaria**, a meno che non abbia origine biologica e/o provenga dal trattamento dei rifiuti. Queste opzioni sono soggette a limiti sul potenziale disponibile e sulla competizione con altri usi finali. Il biometano non permette di abbattere i costi e migliorare l'efficienza energetica del sistema in maniera comparabile all'elettrificazione, specie in prospettiva futura, e produce comunque inquinanti locali in seguito a combustione.

La compensazione di emissioni di gas serra attraverso tecnologie di abbattimento delle emissioni e stoccaggio della CO₂ sconta gli stessi limiti già evidenziati in precedenza e consistenti, in particolare, nella disponibilità di queste tecnologie a costi economici ed energetici competitivi, anche nel lungo termine.

Infrastrutture ferroviarie ed emissioni sul ciclo di vita

Il trasporto ferroviario ha un basso impatto ambientale ed emissivo in fase di utilizzo, ma un elevato impatto in termini di costruzione dell'infrastruttura: linee ferrate, linee elettriche, ponti, tunnel. In particolare, le emissioni legate alla costruzione di infrastrutture ferroviarie sono maggiori rispetto a quelle necessarie sia per l'aviazione che per i trasporti su gomma, suoi concorrenti sulle varie distanze. Questo aspetto va attentamente analizzato nell'ottica di un processo di decarbonizzazione complessiva. In altre parole, **l'analisi sul ciclo di vita delle**

emissioni è determinante per stabilire la sostenibilità di una linea di trasporto ferroviario. A tal fine, occorre tenere conto di diversi processi, inclusa l'estrazione, la lavorazione e la messa in opera dei materiali, la costruzione e manutenzione di infrastrutture e veicoli e l'energia necessaria al loro uso.

Energia ed emissioni necessarie alla costruzione e alla manutenzione delle linee dipendono in modo significativo dal tipo di infrastruttura costruita, dai materiali e processi usati per costruirla, dalla presenza di gallerie o ponti e dalle caratteristiche operative, quali l'intensità di carbonio dell'elettricità usata dai treni nel corso degli anni. Un altro fattore temporale rilevante è la frequenza di utilizzo dell'infrastruttura. Alte frequenze richiedono tempi brevi per portare benefici netti in termini di riduzione di gas serra per chilometro percorso da passeggeri e/o merci. Al contrario, le linee caratterizzate da basse frequenze, che sono anche più difficili da finanziare, possono richiedere diversi decenni per arrivare in parità con le emissioni delle opzioni alternative aeree o su gomma. **L'analisi di questi aspetti è particolarmente importante per le nuove tratte ad alta velocità, che vanno prioritariamente sviluppate per connettere grandi centri urbani, al fine di minimizzare le emissioni e massimizzare l'efficienza energetica sul ciclo di vita.**



4. Decarbonizzare il trasporto navale

Primo obiettivo: efficienza

Nel 2019 il traffico navale in Italia ha emesso 4,5 Mt CO₂ di gas serra, pari all'1,1% delle emissioni nazionali complessive⁵². Questo numero include esclusivamente le rotte interamente effettuate in territorio italiano, a cui vanno aggiunte le emissioni relative al trasporto marittimo internazionale, stimate in 8,5 Mt CO₂⁵³.

L'abbattimento delle emissioni in questo settore dipenderà principalmente dallo sviluppo di navi più efficienti dal punto di vista energetico e dalla transizione verso vettori decarbonizzati. Una gamma di opzioni può infatti migliorare l'efficienza energetica di navi esistenti e delle nuove navi, tra cui modifiche progettuali di ottimizzazione strutturale, riduzione della resistenza/attrito con l'acqua, miglioramento dell'efficienza delle eliche e dei motori principali e ausiliari. A queste opzioni si aggiunge l'integrazione di energie rinnovabili, in particolare l'assistenza del vento, capace anch'essa di abbattere i consumi di combustibile. Il miglioramento dell'efficienza è importante anche in fase operativa (per esempio, mediante l'ottimizzazione della velocità in funzione della disponibilità di accessi in porto), il che non solo facilita l'allineamento agli obiettivi di decarbonizzazione delineati dall'*International Maritime Organization* (IMO), ma permette anche di abbattere i costi di gestione.

Inoltre, **la riduzione della domanda di combustibili** in altri settori economici legata alla transizione verso energie rinnovabili ed elettrificazione potrebbe contribuire ulteriormente a ridurre l'attività di trasporto marittimo per il trasporto di combustibili, che conta attualmente per un terzo del commercio marittimo internazionale⁵⁴.

⁵² ISPRA (2021), *Italian greenhouse gas inventory report 1990-2019 – National inventory report 2021*, [<https://www.isprambiente.gov.it/files2021/...>].

⁵³ I dati dell'IEA (OECD (2022), *IEA CO₂ Emissions from Fuel Combustion Statistics: Greenhouse Gas Emissions from Energy*, [<https://doi.org/10.1787/CO2-data-en>]) indicano 8,5 Mt CO₂ di emissioni dirette per international bunkers e 1,9 Mt per consumo domestico nel settore navale. I dati ISPRA riportano 6,5 Mt per international bunkers (ISPRA (2021), *Italian greenhouse gas inventory report 1990-2019 – National inventory report 2021*, [<https://www.isprambiente.gov.it/files2021/...>]).

⁵⁴ UNCTAD (2021), *Review of maritime transport*, [<https://unctad.org/...>]

La decarbonizzazione del settore marittimo dovrebbe anche tenere in considerazione un ripensamento dell'attuale modello produttivo delocalizzato globale, basato su due presupposti che si potrebbero in futuro rivelare non più validi:

- una disponibilità sostanzialmente illimitata di combustibile e capacità di carico a basso prezzo che rendono trascurabili i costi di trasporto;
- una vigenza limitata di regole e politiche volte a mitigare le emissioni inquinanti e climalteranti in acque internazionali.

Una decarbonizzazione solida e credibile di questo settore potrà quindi avvenire anche riavvicinando alcuni bacini produttivi ai luoghi di consumo, seguendo gli indirizzi europei per favorire la filiera corta, limitando così la quantità di beni che si sposta tra un continente e l'altro.

Tecnologie e combustibili alternativi

Elettrificazione dei porti

Nel momento in cui le navi sono in porto, i motori e i generatori ausiliari restano accesi per fornire i servizi energetici di bordo, creando seri problemi di inquinamento nelle città portuali, oltre che emissioni consistenti di CO₂. Circa l'11% delle emissioni globali di gas serra marittime è infatti prodotto da navi che sono ancorate o ormeggiate e questa quota è superiore al 20% nel caso di petroliere e navi per il trasporto di prodotti chimici⁵⁵. Per affrontare questo problema è possibile intervenire per **eliminare, o almeno ridurre, l'uso dei motori delle navi in porto attraverso il collegamento delle imbarcazioni alla rete elettrica**. Questo processo, denominato **cold ironing**, è previsto anche dalla proposta di regolamento su *alternative fuels infrastructures*⁵⁶.

I paesi nordici sono all'avanguardia su questo tema, dal momento che offrono già da tempo nei loro principali porti degli impianti di alimentazione elettrica per navi all'attracco. Il porto di Stoccolma, ad esempio, era già stato dotato di questo servizio negli anni '80, seguito dal porto di Göteborg negli anni '90; i porti finlandesi di Kemi, Kotka e Oulu hanno invece installato impianti di alimentazione elettrica per le navi negli anni 2000. In questi paesi sono stati previsti inoltre meccanismi di sovvenzione agli armatori che intendono dotare le proprie navi di predisposizione all'alimentazione elettrica da terra⁵⁷.

Un segmento in crescita sul *cold ironing* è quello delle **grandi navi da crociera** che, per dimensioni e consumi, risultano particolarmente impattanti quando ancorate nei porti con i motori accesi. Questo tipo di navi assorbe infatti grandi potenze elettriche, che necessitano di infrastrutture adeguate. Ad esempio, per fornire energia a tre navi da crociera contemporaneamente, il porto norvegese di Bergen e la società di energia

⁵⁵ IMO (2020), *Fourth IMO GHG Study 2020 – Final report*, [<https://imoarcticsummit.org/...>].

⁵⁶ Commissione Europea (2021), Regulation of the European Parliament and of the Council on the deployment of alternative fuels infrastructure, and repealing Directive 2014/94/EU of the European Parliament and of the Council, [<https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/...>].

⁵⁷ ITF (2020), *Navigating towards cleaner maritime shipping – Lessons from the Nordic region*, [<https://www.itf-oecd.org/navigating...>].

rinnovabile BKK hanno fondato una società che costruirà il più grande impianto di alimentazione elettrica portuale d'Europa.

Molte navi moderne utilizzano già motori elettrici, alimentati con energia elettrica prodotta da generatori diesel o turbine, e pertanto si prestano bene a operazioni di *retrofitting* con batterie o combustibili decarbonizzati.

Elettrificazione delle navi

Si tratta di un approccio già in parte intrapreso e **applicato con successo nei paesi scandinavi su tratte brevi coperte da navi traghetto (RO-RO)**, cioè su collegamenti comparabili a quelli tra la penisola italiana e le isole minori, con trasporto automezzi. Anche in Italia cominciano ad operare navi RO-RO ibride (Gruppo Grimaldi)⁵⁸. Nel 2020 si contavano circa 250 navi elettriche/ibride a batteria operative o vicine al varo a livello globale, di cui il 40% in Norvegia⁵⁹. A marzo 2022, il numero di navi elettriche è più che raddoppiato, raggiungendo quasi le 600 unità⁶⁰.

In Norvegia, nel 2019 è stata giudicata redditizia la sostituzione di 127 dei 180 traghetti a gasolio con navi a batteria. Situazioni analoghe sono presenti in altri paesi nordici. In particolare, il 70% delle rotte dei traghetti in Danimarca è stimata più redditizia con l'utilizzazione delle navi elettriche. La navigazione a batteria è già una realtà per numerosi traghetti RO-RO, alcuni dei quali operano tra Danimarca e Svezia. Le batterie sono adottate anche in altri tipi di navi: **imbarcazioni per la manutenzione delle infrastrutture energetiche offshore, navi da crociera, rimorchiatori, pescherecci**.

La bassa densità di energia delle batterie limita l'applicabilità dell'elettrificazione integrale alle brevi distanze. Attualmente la *e-ferry* Ellen in Danimarca, introdotta nel 2020 sulla distanza più lunga con le sole batterie, copre 22 miglia nautiche (40 km)⁶¹, mentre il catamarano per quasi 300 passeggeri Rygerelektra – il più veloce nella sua classe – ne può coprire tra 45 e 60 (74-93 km: la distanza dipende dalla velocità)⁶². **L'elettrificazione integrale non è invece un'opzione sulle tratte più lunghe, per le quali la decarbonizzazione deve puntare necessariamente a combustibili alternativi.**

Combustibili alternativi sulle grandi distanze

Le soluzioni di decarbonizzazione per lunghe distanze non sono oggi a portata di mano e lo potranno eventualmente essere solo a seguito di significativi sviluppi tecnologici. I motivi principali sono l'enorme quantità di combustibili che utilizzano le grandi navi, l'attuale completa dipendenza da combustibili fossili, la necessità di sviluppare vettori energetici decarbonizzati e il fatto che questi ultimi avranno, in assenza di una penalità di prezzo sul carbonio fossile, costi maggiori. A oggi,

⁵⁸ [\[https://www.grimaldi.napoli.it/it/read_123.html\]](https://www.grimaldi.napoli.it/it/read_123.html).

⁵⁹ ITF (2020), *Navigating towards cleaner maritime shipping – Lessons from the Nordic region*, [\[https://www.itf-oecd.org/navigating...\]](https://www.itf-oecd.org/navigating...).

⁶⁰ DNV (2022), *Alternative fuels insight*, [\[https://www.dnv.com/services/...\]](https://www.dnv.com/services/...).

⁶¹ Lambert (2019), *All-electric ferry with longest range in operation saves 2,000 tons of CO₂ a year*, [\[https://electrek.co/2019/...\]](https://electrek.co/2019/...).

⁶² Kane (2021), *Meet The World's Fastest Electric Ferry With A Massive 2 MWh Battery*, [\[https://insideevs.com/news/428001/...\]](https://insideevs.com/news/428001/...).

i *cargo* che fanno la spola tra i porti dell'Asia Orientale e l'Europa consumano migliaia di tonnellate di combustibile per ogni singolo viaggio, della durata di 30-40 giorni, e i mari sono solcati da migliaia di queste imbarcazioni sulle rotte intercontinentali che si riforniscono in enormi depositi (bunker) situati nei porti. Questi porti dovrebbero quindi disporre di un flusso continuo di combustibili alternativi decarbonizzati.

Dal momento che la decarbonizzazione completa del settore navale sulle grandi distanze richiede tecnologie di produzione di combustibili non attualmente in uso nel settore e infrastrutture di trasporto e rifornimento, è importante iniziare a **sviluppare soluzioni alternative su rotte specifiche e grandi porti, da replicare nel seguito su altre rotte e altri porti**⁶³.

GNL

Un incremento dell'uso di GNL in ambito navale è uno scenario che ha assunto di recente prospettive più concrete di quanto non fosse in passato. Una ragione strutturale è legata alla sicurezza energetica e alla decisione dei governi europei di ridurre la propria dipendenza dal gas russo a seguito dell'invasione dell'Ucraina. L'uso crescente del GNL come combustibile navale è reso possibile anche dall'incremento dei flussi commerciali di gas naturale importati in Europa su navi metanifere (che non solo trasportano, ma possono anche usare il gas naturale come fonte energetica), al fine di sostituire progressivamente i flussi di gas che venivano veicolati attraverso i gasdotti tra l'Europa e la Russia.

Il gas naturale è anche la soluzione più immediata per diversificare l'utilizzo del combustibile tradizionale per le navi, che è la frazione più pesante e quindi più inquinante della raffinazione del petrolio. Le recenti dinamiche dei prezzi, specie in Europa e sempre legate alla crisi in Ucraina, sono tuttavia un fattore limitante in questo senso, dal momento che hanno completamente annullato il vantaggio economico del gas fossile (in termini di costo per unità di energia) rispetto all'uso di combustibili derivati dal petrolio.

Il GNL può aiutare a ridurre le emissioni di NO_x, SO_x e altri inquinanti atmosferici rispetto al combustibile navale standard. Il GNL può inoltre ridurre di circa il 20% le emissioni dirette di CO₂ prodotte dalle navi e permette di abbattere le emissioni di *black carbon* (per questo motivo è considerato il combustibile più promettente per sostituire l'HFO in navi operanti nell'Artico a far data dal luglio 2024 come stabilito dall'IMO). Tuttavia, **le emissioni fuggitive di metano, sia nei motori, sia lungo la catena di approvvigionamento a monte, rischiano di portare a emissioni di gas serra sul ciclo di vita più elevate rispetto all'uso dei combustibili liquidi tradizionali.** Le emissioni legate all'uso di GNL fossile in ambito navale, come nel caso del trasporto su gomma, non sono significativamente inferiori, se analizzate rispetto al ciclo di vita, rispetto al caso di combustibili liquidi derivati dal petrolio. Alcune ricerche hanno evidenziato come navi equipaggiate con motori a GNL presentavano minori emissioni di CO₂, NO_x e SO_x rispetto ad alimentazione a MGO (Marine Gasoil), ma emissioni più elevate di CO e di idrocarburi, in particolare di metano incombusto⁶⁴. In altre parole, **il GNL non sembra essere una soluzione adeguata**

⁶³ GMF (2021), The Next Wave: Green Corridors, [<https://www.globalmaritimeforum.org/...>].

⁶⁴ Anderson, M., Salo, K. & Fridell, E. (2015). *Particle- and Gaseous Emissions from an LNG Powered Ship*. *Environmental Science & Technology*, 49(20), pp.12568-12575. [<https://pubs.acs.org/doi/...>]

agli obiettivi di decarbonizzazione con l'ambizione del *Green Deal* e della strategia iniziale di abbattimento delle emissioni (che prevede un dimezzamento al 2050 rispetto al 2008) decisa nel contesto dell'IMO.

Anche per le navi un'opzione per l'abbattimento delle emissioni di gas serra sul ciclo di vita potrebbe essere rappresentata dal **GNL di origine biologica** (biometano). Tuttavia, come il GNL fossile, questo tipo di tecnologia richiede investimenti significativi per lo sviluppo di nuove infrastrutture di distribuzione, non facili da giustificare a causa di diversi fattori. Tra questi, un potenziale limitato di materia prima (rifiuti, scarti agricoli e forestali), una produzione in contesti spesso non prossimi alle zone portuali, la competizione da parte di altri usi finali (riscaldamento, industria pesante, energia – specialmente rilevanti dopo l'invasione dell'Ucraina, dati gli effetti sul prezzo del gas fossile, nonché considerazioni relative alla sicurezza energetica per questi settori) e le perdite energetiche della liquefazione e i costi ad esse associati.

Metanolo e idrocarburi sintetici

Le caratteristiche chimico-fisiche del **metanolo** (CH_3OH), il più piccolo tra gli alcoli, lo rende **potenzialmente interessante come combustibile nei trasporti marittimi**. Il motivo è duplice: da un lato è liquido e quindi permette di utilizzare in buona parte – e con modifiche limitate rispetto al caso dei gas – le tecnologie e le infrastrutture esistenti dei prodotti petroliferi; dall'altro, è il combustibile liquido che ha il più basso contenuto relativo di carbonio e il più alto di idrogeno. Quindi, il suo uso può portare a una riduzione delle emissioni di CO_2 ai camini rispetto ai combustibili tradizionali⁶⁵.

Il metanolo è attualmente sintetizzato in grandi impianti chimici in tutti i continenti, la sua produzione mondiale ammonta a 110 milioni di tonnellate⁶⁶ ed è disponibile attualmente in più di 100 porti in tutto il mondo⁶⁷. È una molecola utilizzata nella chimica di base per la produzione di una varietà di molecole ed è utilizzato in misura crescente nel settore energetico, in miscela con la benzina o nella produzione di biodiesel. Attualmente, però, la produzione di metanolo è basata quasi interamente sui combustibili fossili, soprattutto metano e carbone, il che determina un'intensità di emissioni di gas serra sul ciclo di vita superiore ai combustibili marittimi esistenti.

In un'ottica di decarbonizzazione, **l'idoneità del metanolo come carburante per navi dipenderà dal metodo di produzione, come per tutti i combustibili**. Alternative sostenibili alla produzione da fonti fossili includono il biometano e le biomasse e, in prospettiva, miscele di idrogeno decarbonizzato e monossido di carbonio ottenuto da processi di riciclo della CO_2 , in analogia con altri idrocarburi sintetici⁶⁸.

In condizioni non caratterizzate da incrementi notevoli del prezzo del petrolio e di quello del gas naturale, **i costi di produzione di metanolo e altri idrocarburi sintetici liquidi a basse emissioni risultano essere più alti** rispetto alle opzioni basate sui

⁶⁵ Il metanolo è anche interessante come vettore di idrogeno, potendo portare in forma liquida per unità di volume a temperatura ambiente una quantità di idrogeno superiore sia rispetto all'idrogeno compresso a 700 bar, sia rispetto all'idrogeno liquido (-253°C). L'idrogeno può essere estratto dalla molecola di metanolo per mezzo di un processo semplice di *steam reforming* per essere poi usato in celle a combustibile per produrre elettricità e alimentare motori navali elettrici.

⁶⁶ <https://www.methanol.org/the-methanol-industry/>.

⁶⁷ DNV (2020), *Methanol as a potential alternative fuel for shipping: A brief talk with Chris Chatterton of the Methanol Institute*, <https://www.dnv.com/maritime/advisory/...>.

⁶⁸ Una discussione su queste opzioni è presente nel Capitolo 2.

combustibili fossili, ma sono in parte mitigati dalla possibilità di utilizzare i sistemi di stoccaggio e distribuzione di combustibili liquidi attualmente disponibili nei porti e nelle navi. Questo costituisce un vantaggio significativo rispetto all'utilizzo come vettore energetico per le navi del metano, sia sintetico che fossile, o dell'idrogeno.

Il metanolo è tuttavia anche associato a rischi sanitari considerevoli, poiché è una molecola fortemente neurotossica e pressoché inodore. Attualmente, viene utilizzato in maniera massiccia dall'industria chimica da personale specializzato e addestrato, ma un uso diffuso nel settore dei trasporti presso una platea più ampia di lavoratori e utenti richiederebbe protocolli dedicati per operare in sicurezza.

Progetti pilota per l'uso di metanolo come combustibile per le navi sono già in corso di sviluppo, specie nei paesi scandinavi, in cui il gruppo Mærsk ha già commissionato portacontainer oceaniche capaci di usare metanolo, assicurando, attraverso partenariati con produttori localizzati in diverse zone globali, l'approvvigionamento di metanolo prodotto con carbonio di origine biogenica già dal 2025⁶⁹. Questo tipo di attività dovrebbe essere sviluppato anche in Italia e potrebbe beneficiare in modo significativo delle attività internazionali relative ai "corridoi verdi", che consistono nello sviluppo di rotte servite da combustibili a basse emissioni sul ciclo di vita, volte a supportare lo sviluppo di tecnologie e infrastrutture necessarie alla decarbonizzazione del settore navale⁷⁰.

Biocombustibili

A questo settore sono applicabili tutte le considerazioni tecniche discusse in precedenza per i biocombustibili compatibili con il gasolio e, per quanto riguarda l'aviazione, con il cherosene (v. *infra* Capitolo 4), dal momento che tali combustibili sono analoghi a quelli utilizzabili per i trasporti navali. Occorre tenere presente, però, che il settore marittimo – come quello dell'aviazione – necessita maggiormente di combustibili decarbonizzati rispetto al trasporto stradale, a causa della limitata rilevanza delle opzioni di elettrificazione.

Per questa ragione, i **biocombustibili, così come i combustibili sintetici, possono avere un ruolo importante** nella riduzione della domanda di prodotti petroliferi e delle emissioni di gas serra nel trasporto marittimo, ferma restando la necessità di fare ricorso a prodotti derivati da filiere sostenibili e capaci di abbattere le emissioni sul ciclo di vita del combustibile. **Questa trasformazione richiede necessariamente un solido quadro normativo**, in linea con le disposizioni della *Renewable Energy Directive* (comprese le modifiche proposte nel pacchetto *Fit for 55*), che non risulta però ancora

⁶⁹ Maersk (2021), A.P. Moller – *Maersk accelerates fleet decarbonisation with 8 large ocean-going vessels to operate on carbon neutral methanol*, [<https://www.maersk.com/news/...>], Frangoul (2021), *Maersk inks deal to secure supply of 'green' e-methanol for vessel, targets 2023 launch*, [<https://www.cnbc.com/2021/08/19/...>] e Maersk (2022), A.P. Moller – *Maersk engages in strategic partnerships across the globe to scale green methanol production by 2025*, [<https://www.maersk.com/news/articles/2022/03/...>].

⁷⁰ Global Maritime Forum (2021), *The Next Wave: Green Corridors can get the ball rolling on the transition to zero-emission shipping*, [<https://www.globalmaritimeforum.org/press/the-next-wave-green-corridors...>], Joerss et al. (2021), *Green corridors: A lane for zero-carbon shipping*, [<https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/...>], World Economic Forum (2022), *How green corridors can enable the transition to zero-emission shipping*, [<https://www.weforum.org/agenda/2022/01/...>], US Department of State (2022), *Green Shipping Corridors*, [<https://www.state.gov/green-shipping-corridors>].

formalizzato a livello di IMO (ed il cui sviluppo va dunque incoraggiato). Considerazioni simili si applicano anche per altri parametri che definiscono le caratteristiche dei combustibili navali e ne influenzano le emissioni di inquinanti atmosferici locali, dal momento che la qualità del combustibile fossile per il settore navale è significativamente inferiore rispetto al caso dei combustibili per il trasporto su gomma.

Attualmente, **l'uso di biocombustibili in ambito navale è oggetto di diversi progetti sperimentali, specie nel Nord Europa, ma non ancora in Italia**. L'avvio di esperienze pilota anche nel nostro Paese è quindi fortemente raccomandato.

Idrogeno e ammoniaca

L'utilizzo di idrogeno nel settore navale è in una fase di sperimentazione preliminare. Può essere utilizzato in celle a combustibile (con un'efficienza pari al 50-60%) oppure con combustione diretta (con un'efficienza pari al 40-50%). La sua produzione in forma decarbonizzata⁷¹ è limitata per ora a progetti di piccola scala ed è ancora soggetta a costi che non ne garantiscono un'alta competitività, come avviene anche per il trasporto e la distribuzione.

A bordo delle imbarcazioni l'idrogeno deve essere compresso (300-700 bar) oppure liquefatto (-252 °C). Entrambe le opzioni comportano un consumo energetico elevato e richiedono l'utilizzo di materiali per lo stoccaggio e la trasmissione che non siano soggetti a rischi elevati di infragilimento e perdite, dal momento che questi sono problemi molto rilevanti nella gestione di infrastrutture per l'idrogeno. Sistemi di bunkeraggio di idrogeno sulle navi o nei porti richiederebbero allo stesso modo lo sviluppo di una costosa infrastruttura e avranno comunque bisogno della definizione di apposite normative di sicurezza, che attualmente non esistono.

Un **potenziale vettore energetico alternativo per i trasporti navali è l'ammoniaca** (NH₃). Questa è attualmente necessaria soprattutto per la produzione di fertilizzanti ed è ottenuta da processi chimici che combinano azoto di origine atmosferica e idrogeno prodotto dal gas naturale (72%) o da carbone (22%, specie in Cina)⁷², quindi con emissioni significative di gas serra e – specie in seguito all'invasione dell'Ucraina e nel caso della produzione a partire dal gas – a prezzi in significativa crescita. Tuttavia, l'ammoniaca potrebbe essere prodotta a basse emissioni ("verde") a partire da idrogeno decarbonizzato, azoto atmosferico ed elettricità decarbonizzata⁷³ ed essere usata anche come combustibile. Questo uso è possibile in applicazioni stazionarie (es. impianti di

⁷¹ Le principali opzioni possibili per produrre idrogeno decarbonizzato sono discusse nel Cap. 2.

⁷² Dimitriou and Javaid (2020), *A review of ammonia as a compression ignition engine fuel*, [\[https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.209\]](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.209).

⁷³ L'elettricità decarbonizzata è necessaria per la sintesi di idrogeno (a partire dall'acqua) e per la separazione dell'azoto dagli altri componenti dell'aria. Anche in questo caso occorre una vastissima disponibilità di elettricità rinnovabile a basso costo per poter competere con la produzione da combustibili fossili. Processi alternativi (ammoniaca "blu" o "turchese") consentono, tecnicamente, la produzione di ammoniaca a basse emissioni di gas serra a partire dal gas naturale fossile, ma richiedono lo stoccaggio geologico della CO₂ (ammoniaca "blu") o la produzione di carbonio polverizzato come co-prodotto (ammoniaca "turchese"). Questi processi non sono stati, a oggi, dimostrati sul campo in scala significativa e sono oggetto di progetti di ricerca. A seguito dell'invasione dell'Ucraina da parte della Russia e all'incremento dei prezzi del metano, queste opzioni sono anche soggette a profili di competitività economica ridotta rispetto a quanto non lo fossero in precedenza.

produzione di elettricità) e potenzialmente anche nelle navi, ma si tratta di applicazioni ancora in fase di sperimentazione preliminare.

L'ammoniaca può essere utilizzata in tre modi:

- come vettore di idrogeno, che viene "liberato" attraverso processi catalitici;
- come combustibile, richiedendo però l'utilizzo di un altro carburante "pilota" per sostenere il processo (es. un biocombustibile) e motori capaci di utilizzarla;
- in celle a combustibile ad ammoniaca, anch'esse in una fase non tecnologicamente disponibile.

La gestione di sistemi del bunkeraggio di ammoniaca sulle navi o nei porti richiederebbe lo sviluppo di una costosa infrastruttura e apposite normative di sicurezza, trattandosi di una molecola altamente corrosiva e tossica. Pur essendo difficile che grandi depositi di ammoniaca possano essere creati nei porti italiani – che si trovano spesso inseriti in contesti urbani altamente antropizzati – oggi l'ammoniaca è un prodotto che ha un vasto mercato internazionale⁷⁴ ed è quindi soggetto a procedure di gestione in sicurezza e sistemi di stoccaggio ben collaudati.

Uno **sviluppo commerciale rilevante di navi alimentate a idrogeno o ammoniaca altamente decarbonizzati richiederà almeno dieci anni**. Progetti pilota sono già in corso di sviluppo nei paesi scandinavi, in Corea⁷⁵ e in Giappone⁷⁶ e dovrebbero essere sviluppati anche in Italia, sfruttando anche lo sviluppo di "corridoi verdi" in ambito internazionale. Motori navali capaci di usare l'ammoniaca come combustibile sono in corso di sviluppo da parte dei principali costruttori globali⁷⁷.

La **Figura 3** riassume lo stato di maturità di diverse opzioni alternative ai combustibili tradizionali nel trasporto navale ai fini dell'abbattimento delle emissioni secondo un Centro di ricerca indipendente focalizzato sulla transizione del settore navale verso zero emissioni nette (Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping). La **Figura 4** delinea i tempi relativi all'adozione di tecnologie ad ammoniaca, idrogeno e metanolo per le navi, secondo una delle principali società di classificazione navale, che stabilisce e mantiene standard tecnici per la costruzione e l'esercizio delle navi (DNV). Infine, la **Figura 5** riporta un'immagine di sintesi presentata in un Rapporto della Banca Mondiale sulle prospettive delle diverse opzioni disponibili per allineare il trasporto navale agli obiettivi dell'Accordo di Parigi e alla strategia per l'abbattimento delle emissioni di IMO. Si considerano, in particolare, il potenziale produttivo su larga scala, la capacità di abbattimento delle emissioni, i costi di produzione e i rischi finanziari legati alle diverse opzioni.

⁷⁴ [\[https://oec.world/en/profile/hs92/ammonia\]](https://oec.world/en/profile/hs92/ammonia).

⁷⁵ Herh (2021), *Korean, Chinese and Japanese Shipbuilders Racing to Develop Ammonia-powered Vessels*, [\[http://www.businesskorea.co.kr/news/...\]](http://www.businesskorea.co.kr/news/...).

⁷⁶ NYK (2021), *Demonstration Project Begins for Commercialization of Vessels Equipped with Domestically Produced Ammonia-Fueled Engine*, [\[https://www.nyk.com/english/news/2021/...\]](https://www.nyk.com/english/news/2021/...).

⁷⁷ Wärtsilä (2020), *World's first full scale ammonia engine test - an important step towards carbon free shipping*, [\[https://www.wartsila.com/...\]](https://www.wartsila.com/...); Lindstrand (n. d.), *Unlocking ammonia's potential for shipping*, [\[https://www.man-es.com/discover/...\]](https://www.man-es.com/discover/...).

Figura 3: Maturità di diverse opzioni di combustibili alternativi, potenzialmente a basse emissioni, per il trasporto marittimo. Rielaborazione basata su rapporto DNV - [\[Link\]](#)

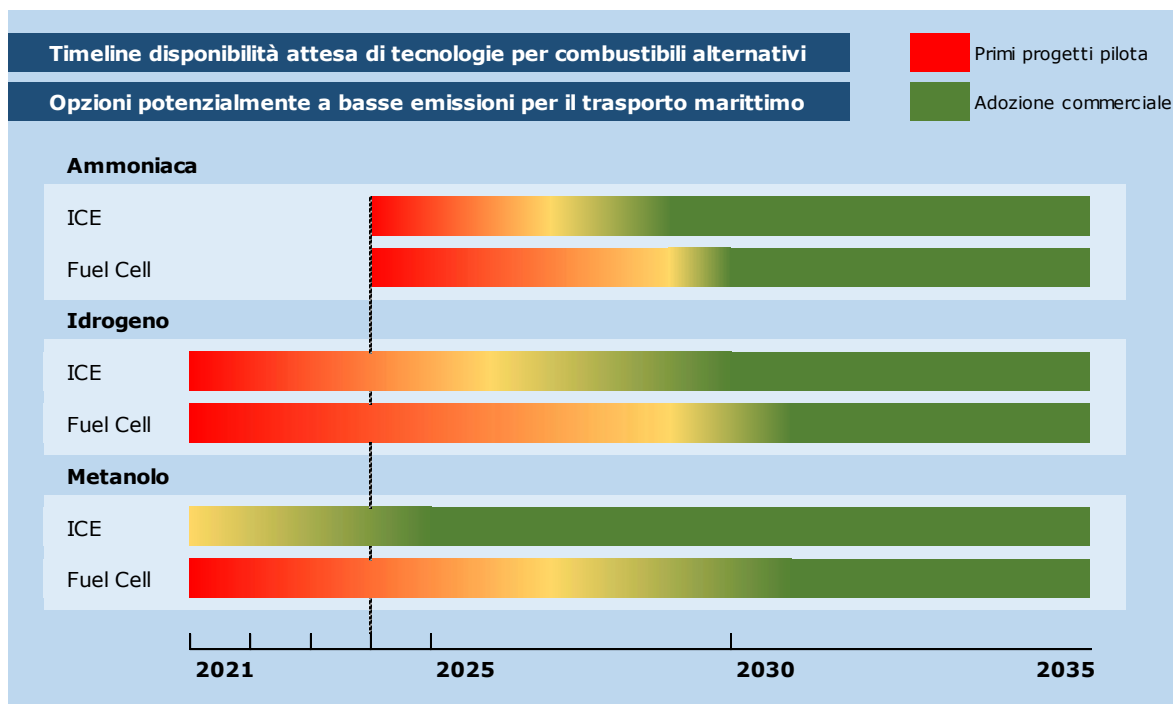
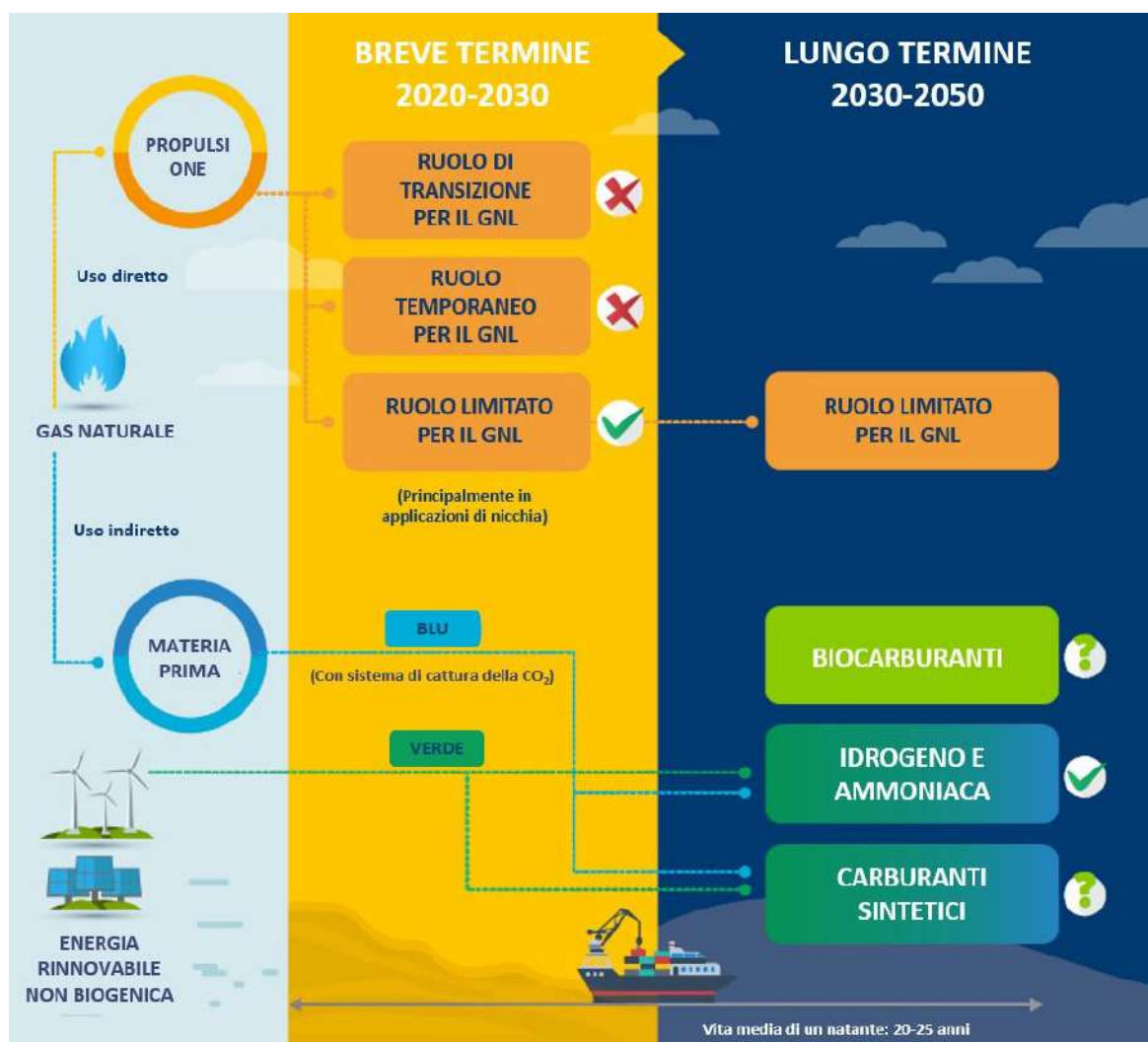


Figura 4: Tempi stimati per l'adozione di tecnologie ad ammoniac, idrogeno e metanolo per le navi (non si tiene conto della provenienza dei combustibili e quindi del loro livello di decarbonizzazione) – Rielaborazione basata su rapporto Mærsk Mc-Kinney Møller Center - [\[Link\]](#)

	Vettore energetico	Disponibilità feedstock	Produzione carburante	Stoccaggio, logistica, bunkeraggio	Tecnologia matura e collaudata	Soluzioni identificate	Sfide da superare
					Conversione carburante a bordo	Gestione carburante e sicurezza a bordo	Normativa
Combustibili alternativi per la decarbonizzazione	Combustibili fossili						
	Idrogeno verde						
	Idrogeno blu						
	Ammoniac verde						
	Ammoniac blu						
	Metanolo sintetico						
	Bio-Metanolo						
	Metano sintetico						
	Bio-Metano						
	Biocarburanti						

Figura 5: Aspettative di sviluppo di vettori energetici decarbonizzati per il trasporto navale. Rielaborazione basata sul report della World Bank "The Role of LNG in the Transition Toward Low- and Zero-Carbon Shipping" - [\[Link\]](#)



Compensazione delle emissioni

In aggiunta alle opzioni discusse fin qui esiste anche **la possibilità di ricorrere all'abbattimento delle emissioni e stoccaggio della CO₂** al fine di compensare le emissioni che risultano dall'estrazione e l'uso di idrocarburi. Nel caso del trasporto navale, questa soluzione sarebbe in competizione con altre tecnologie di abbattimento delle emissioni dei combustibili, con risultati dipendenti dal costo di produzione delle diverse opzioni e dalla effettiva capacità di dimostrare un abbattimento netto. Ciò richiederebbe un sistema adeguato di contabilizzazione delle stesse, su scala internazionale.

Le opzioni sviluppate sino a oggi consistono principalmente in compensazione attraverso **progetti di riforestazione**, con tempi di assorbimento delle emissioni (fenomeno che

si verifica nell'arco di decenni) non allineati con quelli della loro produzione (che avviene con la combustione, nell'immediato). Queste pratiche sono quindi esposte a rischi significativi di ritardare la riduzione della concentrazione di gas serra. Altre soluzioni tecnologiche, che coinvolgono lo **stoccaggio geologico di emissioni di CO₂**, richiedono comunque fonti di carbonio di origine biogenica e/o facenti parti di un ciclo chiuso (es. da cattura atmosferica) per essere efficaci e sono comunque soggette a limitazioni, nonostante abbiano la capacità tecnica di competere in termini di minimizzazione dei costi, con le opzioni discusse in precedenza⁷⁸. Le limitazioni riguardano la disponibilità di biomassa sostenibile (in competizione con altri settori), la disponibilità di energia decarbonizzata necessaria alla cattura della CO₂ e al suo stoccaggio geologico, in aggiunta a un quadro normativo che le garantisca l'efficacia.

Elementi che oggi sollevano dubbi sull'efficacia delle soluzioni di compensazione includono il rischio di indurre ritardi nell'attuazione di altre azioni volte ad abbattere le emissioni, il fatto che l'uso delle tecnologie di stoccaggio geologico della CO₂, ad oggi, è esclusivamente finanziato dalle attività di "*enhanced oil recovery*", finalizzate all'incremento di estrazione di fonti di energia fossili e la necessità di garantire lo stoccaggio geologico per tempi molto lunghi. Questo fatto solleva interrogativi relativi alla responsabilità finanziaria nel lungo termine e alla giustizia intergenerazionale, assimilabili al caso delle scorie nucleari.

Priorità per la decarbonizzazione del settore

In conclusione, le priorità per la decarbonizzazione del trasporto marittimo risultano essere le seguenti:

- lo sviluppo di tecnologie capaci di **incrementare l'efficienza energetica e l'assistenza del vento** per tutte le navi;
- la costruzione di infrastrutture di **accesso all'elettricità per le navi in stazionamento**, affiancate a politiche che ne richiedano l'uso;
- la **transizione all'elettrico delle navi traghetto (RO-RO) su tratte inferiori ai 50 km e delle navi veloci** (comprese quelle che servono le isole minori, a partire da quelle che lo fanno con maggiore frequenza);
- lo **sviluppo di motori capaci di utilizzare diversi combustibili**;
- l'avvio di **programmi di ricerca e progetti sperimentali** che consentano di progredire nell'acquisizione di conoscenza, nello sviluppo e dimostrazione di **combustibili/vettori energetici alternativi** e nella standardizzazione tecnica dell'intero sistema (navi, porti, infrastrutture energetiche di servizio), anche nel contesto di "corridoi verdi", in ambito nazionale e internazionale, per consentirne la diffusione in scala. In questo contesto, occorrerà sempre dare

⁷⁸ La competitività economica potrebbe emergere se il costo combinato dell'utilizzo della cattura e dello stoccaggio di carbonio a ciclo chiuso (per esempio di origine biogenica) e dell'estrazione e raffinazione dei combustibili convenzionali a base di petrolio (che contengono idrogeno) fosse inferiore al costo di produzione di combustibili prodotti utilizzando gli stessi flussi di carbonio a ciclo chiuso e idrogeno decarbonizzato (per esempio "verde").

priorità all'uso di biocombustibili e idrocarburi sintetici decarbonizzati, poiché le alternative sono particolarmente limitate.

Tali misure dovrebbero essere sviluppate in cooperazione con l'industria e potrebbero essere finanziate con fondi pubblici e/o con le entrate della tassazione sul carbonio, a eccezione del caso della cattura e dello stoccaggio del carbonio, che può fare leva sui profitti della produzione degli idrocarburi, specie se i prezzi di gas e petrolio rimarranno alti. **Ogni iniziativa dovrebbe comunque essere coerente con la strategia industriale europea,** che include tra gli altri l'alleanza sull'idrogeno pulito e quella sui combustibili rinnovabili a basso contenuto di carbonio.



5. Decarbonizzare il trasporto aereo

Primo obiettivo: efficienza

Nel 2019 il traffico aereo in Italia ha emesso 2,4 Mt di gas serra, pari allo 0,6% delle emissioni nazionali complessive⁷⁹, considerando esclusivamente le rotte interamente effettuate in territorio italiano. A questa cifra si aggiungono le emissioni dirette relative al trasporto aereo internazionale, stimate in circa 11,9 Mt CO₂⁸⁰.

La sostituzione del cherosene (Jet A e Jet A1 fuels) di origine fossile nel trasporto aereo è la più grande sfida nella decarbonizzazione dei trasporti. Il cherosene, infatti, combina due proprietà ideali per il volo: una densità energetica molto elevata e la capacità di rimanere liquido fino a -47 °C, che è la temperatura dell'atmosfera attorno ai 10.000 m, cioè alle quote di crociera dei velivoli, rendendo così possibili voli intercontinentali senza interruzioni di oltre 20 ore. La decarbonizzazione del trasporto aereo deve quindi necessariamente andare per gradi, iniziando dalle soluzioni realizzabili oggi per l'abbattimento delle emissioni su ogni tipo di velivolo e pianificando la transizione a nuovi combustibili e vettori energetici, a cominciare dagli aerei più piccoli che percorrono tratte brevi.

La prima opzione da intraprendere è la **riduzione del consumo energetico necessario al volo**, che si realizza in vari modi:

- riduzione del peso dei velivoli utilizzando nuovi materiali costruttivi;
- miglioramento dell'efficienza energetica dei sistemi di propulsione;
- miglioramento dell'aerodinamica dei velivoli;

⁷⁹ ISPRA (2021), *Italian greenhouse gas inventory report 1990-2019 – National inventory report 2021*, [<https://www.isprambiente.gov.it/files2021/...>].

⁸⁰ I dati dell'IEA (OECD (2022), *IEA CO₂ Emissions from Fuel Combustion Statistics: Greenhouse Gas Emissions from Energy*, <https://doi.org/10.1787/co2-data-en>, indicano 11,9 Mt CO₂ di emissioni dirette per *international bunkers* e 2,7 Mt per l'aviazione domestica. I dati ISPRA riportano 12,5 Mt per *international aviation bunkers* (ISPRA (2021), *Italian greenhouse gas inventory report 1990-2019 – National inventory report 2021*, [<https://www.isprambiente.gov.it/files2021/...>]).

- ottimizzazioni operative in fase di atterraggio, decollo e rullaggio per limitare al massimo i tempi di attesa e i consumi connessi.

È possibile migliorare l'efficienza degli aeromobili attualmente in uso senza modifiche radicali della forma del velivolo e del sistema propulsivo. Alcuni esempi includono l'uso crescente di materiali compositi o leghe di metalli più leggere, nuovi metodi di produzione come la stampa 3D al fine di ottimizzare l'uso di materiali, incrementi del rapporto di *bypass* dei motori *turbofan*⁸¹, rotorii aperti⁸², ali allungate⁸³ e sistemi di ingestione dello strato limite⁸⁴. **La combinazione di diverse tecnologie potrebbe abbattere i consumi (per passeggero km) fino al 25% in un decennio e fino al 40% in due decenni rispetto ai valori attuali.** Inoltre, molte soluzioni potrebbero essere anche attuabili a costi negativi (la riduzione dei costi del carburante può superare l'incremento di costo di produzione del velivolo). Questo aspetto dipenderà naturalmente in modo significativo dall'evoluzione del prezzo dei combustibili.

Data la natura oligopolistica e globale del mercato degli aerei, le tecnologie per migliorare l'efficienza si applicano sia al trasporto nazionale che internazionale. Tuttavia, gli elevati costi di capitale per nuovi modelli di aeromobili, i tempi lunghi di sostituzione delle flotte, il livello più basso di maturità di alcune delle tecnologie che offrono i maggiori risparmi energetici e il passo lento dei cambiamenti infrastrutturali nella filiera suggeriscono che **il passaggio a velivoli più efficienti sarà caratterizzato da una transizione progressiva, su tempi relativamente lunghi.**

Sustainable aviation fuels

Per rendere possibile il trasporto aereo sul lungo raggio in un'ottica di decarbonizzazione, **l'unica opzione di diversificazione energetica e decarbonizzazione** (ancorché parziale) **oggi realizzabile è impiegare combustibili alternativi analoghi al cherosene, ma ottenuti da materie prime non fossili**, nel

⁸¹ Il rapporto di *bypass* è dato dalla quantità di aria che attraversa il motore a bassa velocità (attraverso il *fan*, l'elica intubata nella parte anteriore del motore) divisa per quella che entra nel sistema compressore - camera di combustione - turbina (al centro del motore), uscendo a velocità molto più alta rispetto al *fan*. L'efficienza migliora con differenze di velocità inferiori tra aria espulsa dal sistema propulsivo e aeromobile, ed è migliore per rapporti di *bypass* più alti purché l'incremento di peso sia limitato.

⁸² Assomigliano ai motori *turbofan* e massimizzano i rapporti di *bypass* limitando il peso, ma sono soggetti a rumorosità elevata e velocità di crociera inferiori, così da essere più adatti al corto raggio. A causa delle dimensioni debbono essere montati posteriormente e richiedono un diverso design dell'aeromobile. Questo costituisce una barriera significativa alla implementazione di questa tecnologia, specie nel breve termine.

⁸³ L'estensione della lunghezza dell'ala riduce le forze di resistenza sull'aereo, rendendolo più efficiente. È una tecnologia già prossima alla commercializzazione, anche grazie alla possibilità di piegare l'estremità delle ali con il velivolo a terra, consentendo l'utilizzo in aeroporti dove aperture alari elevate potrebbero limitare le opportunità di accesso alle infrastrutture.

⁸⁴ Le tecnologie di ingestione dello strato limite consentono di ri-energizzare il flusso d'aria vicino al corpo dell'aeromobile (lo strato limite) e ridurre la resistenza aerodinamica. Possono essere attivate da uno o più motori da situare nella parte posteriore e/o vicino al corpo dell'aeromobile e, per essere efficaci, richiedono la minimizzazione dell'aumento di peso. Attualmente non sono ancora in uso perché richiedono la disponibilità di propulsione elettrica, o almeno ibrida, per essere più efficaci.

rispetto di criteri chiave di sostenibilità e fattibilità. Questi ultimi includono basse emissioni serra sul ciclo di vita, ridotti impatti diretti e indiretti sul cambiamento dell'uso del suolo, elevata efficienza energetica nella produzione e disponibilità su larga scala. È in questa prospettiva che si inquadrano i combustibili sostenibili per l'aviazione (*Sustainable Aviation Fuels*, SAF), che comprendono biocombustibili e idrocarburi sintetici.

La *American Society for Testing and Materials* (ASTM), ente normativo di riferimento mondiale per la certificazione di combustibili aeronautici, ha approvato diverse opzioni SAF su due categorie principali: cherosene paraffinico sintetico (SPK) e cherosene isoparaffinico sintetico (SIP). I primi sono approvati per rapporti di miscelazione fino al 50%, i secondi fino al 10%. Una ulteriore suddivisione distingue SAF *di origine biogenica* (biocombustibili) dagli *idrocarburi sintetici*. I **SAF di origine biogenica** possono essere raggruppati in tre famiglie principali:

- **oleochimica/lipidica**. Si ottengono per rimozione dell'ossigeno dalle molecole di oli vegetali e grassi inutilizzati o di scarto, sottoposte in seguito a trattamento con idrogeno per ottenere idrocarburi della lunghezza necessaria (10-20 atomi di carbonio). Sono denominati *Hydroprocessed Esters and Fatty Acids Synthetic Paraffinic Kerosene* (HEFA-SPK);
- **biochimica**. Sintetizzati a partire da zuccheri ottenuti da colture dedicate (mais, canna da zucchero) o residui agricoli. Da questi si ottengono per fermentazione etanolo o altri alcool, in seguito trattati con idrogeno e idrocarburi a catena corta per formare cherosene, rimuovendo l'acqua. Sono classificati come *Alcohol-to-Jet Synthetic Paraffinic Kerosene* (ATJ-SPK) o *Hydroprocessed Fermented Sugars Synthetic Isoparaffins* (HFS-SIP);
- **termochimica**. Ottenuti a partire da rifiuti (agricoli, forestali, urbani) sottoposti a un processo di gassificazione per ottenere una miscela di syngas (H_2/CO) convertita in combustili liquidi attraverso processi catalitici Fischer-Tropsch. Sono denominati *Fischer-Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosenes* (FT-SPK).

Come già sottolineato nel caso del trasporto marittimo, gli idrocarburi sintetici possono essere prodotti a partire da idrogeno decarbonizzato ("verde", da elettricità rinnovabile e acqua, o "blu", da gas naturale fossile con stoccaggio geologico della CO_2 , se si dimostra capace di un effettivo abbattimento delle emissioni, e ammesso che sia possibile lo sfruttamento di risorse a prezzi ben inferiori ai valori precedenti al periodo fine 2021/inizio 2022) e carbonio derivato da CO_2 di scarto di origine biogenica o da cattura atmosferica, attraverso sintesi in processi catalitici di tipo Fischer-Tropsch⁸⁵. **I principali limiti per tutti i tipi di SAF sono i costi di produzione elevati e le limitazioni tecniche oggettive per la produzione industriale su larga scala**, in particolare la difficoltà di reperire adeguate quantità di materie prime sostenibili e/o produrre sufficienti quantità di elettricità decarbonizzata a bassi costi. A circa 15 anni

⁸⁵ Dal punto di vista della standardizzazione tecnica, queste tecnologie possono essere integrate nella categoria FT-SPK definita dall'ASTM, per quanto questa non sia stata inizialmente concepita a questo scopo.

dai primi test, e nonostante segnali di incremento in tempi recenti⁸⁶, i SAF costituiscono meno dello 0,1% dei combustibili oggi utilizzati nel trasporto aereo⁸⁷.

Una riduzione marginale dell'intensità di carbonio dei combustibili per aviazione può essere ottenuta anche tramite **combustibili a basse emissioni di carbonio** (*Low Carbon Aviation Fuels*, LCAF), ottenuti dal petrolio, ma con emissioni al di sotto del valore medio standard. Questa tecnologia è ottenibile grazie a processi estrattivi con minori emissioni di gas serra o processi di conversione che integrano miglioramenti di efficienza e l'uso di energia decarbonizzata come l'idrogeno verde nei processi di raffinazione⁸⁸.

A breve termine i SAF da biomassa di provenienza oleochimica saranno probabilmente l'opzione più favorevole per decarbonizzare l'energia usata in aviazione, benché parzialmente, poiché sono più convenienti e tecnologicamente pronti. I combustibili derivati da carbonio biogenico e idrogeno rinnovabile o da processi termochimici sono un'opzione più lontana in termini di livello di sviluppo tecnologico, ma potrebbero contribuire al mix dei SAF con un'accelerazione del progresso tecnologico. In ogni caso, per massimizzare l'abbattimento delle emissioni serra, ridurre gli impatti sui prezzi dei prodotti alimentari e il cambiamento nell'uso del suolo, è importante che tutte queste opzioni utilizzino colture con elevate rese per ettaro o materie prime di scarto (rifiuti agricoli/forestali/urbani). In quest'ultimo caso, i volumi disponibili di materie prime sostenibili sono un fattore limitante per consentire la disponibilità su larga scala. **Data la limitata disponibilità di alternative per decarbonizzare i vettori energetici usati in aviazione e nel trasporto marittimo di lunga distanza, queste opzioni vanno prioritariamente destinate a tali settori.**

Compensazione delle emissioni

Come discusso per altri tipi di trasporto, in linea di principio **vi sono approcci a emissioni negative** come *Biomass Carbon Removal and Storage (BiCRS)*⁸⁹ o *Direct Air Capture (DAC)*, volte a compensare emissioni di gas serra di origine fossile e legate all'estrazione e alla raffinazione di idrocarburi. In coerenza con quanto riportato nella

⁸⁶ IATA (n.d.), *Developing Sustainable Aviation Fuel (SAF)*: [\[https://www.iata.org/en/...\]](https://www.iata.org/en/...).

⁸⁷ European Parliament (2020), *Sustainable aviation fuels*: [\[https://www.europarl.europa.eu/...\]](https://www.europarl.europa.eu/...).

⁸⁸ I LCAF hanno costi di produzione probabilmente inferiori rispetto ai SAF e minori limiti di scalabilità. Il loro svantaggio risiede nel limitato livello di riduzione delle emissioni serra, essendo di origine fossile.

⁸⁹ Questo include una serie di processi che utilizzano la biomassa per rimuovere CO₂ dall'atmosfera per iniettarla nel sottosuolo o catturarla in modo permanente in alcuni prodotti. Le tecnologie BiCRS includono: a) cattura e stoccaggio del carbonio da bioenergia (BECCS), ove la biomassa viene bruciata per generare energia e in seguito la CO₂ risultante è catturata e stoccata in depositi geologici; b) conversione della biomassa (attraverso percorsi biochimici e/o termochimici) in combustibili e altri prodotti energetici, il cui utilizzo è in seguito accompagnato da cattura del carbonio; c) rimozione del carbonio dall'atmosfera in sostanze solide (es. *biochar*) senza produzione di energia, un impiego che deve superare in valore quello della biomassa utilizzata per fini energetici; d) iniezione e smaltimento diretto di bioliquidi (DBID), convertendo la biomassa in bioliquidi o bio-oli che possono essere stoccati in formazioni geologiche profonde per compensare emissioni legate all'estrazione e alla raffinazione di idrocarburi fossili, evitando costi associati a un'ulteriore conversione della biomassa in combustibili.

sezione relativa al trasporto navale (settore che, con l'aviazione, dipende in maniera più spiccata dalla necessità di abbattere il contenuto di carbonio dei combustibili), queste opzioni hanno la **potenzialità di competere**, in termini di minimizzazione dei costi ed efficacia di abbattimento delle emissioni, con diverse forme di SAF, in particolare con le tecnologie più avanzate e ancora più lontane dalla commercializzazione discusse nella sezione precedente.

In analogia con il caso dei combustibili sintetici, queste opzioni richiedono, rispettivamente, elevata disponibilità di biomassa prodotta in modo sostenibile (soggetta alle limitazioni già discusse) ed energia a basse emissioni a costi altamente competitivi. Ulteriori **dubbi e fattori limitanti**, già messi in luce nella sezione relativa al trasporto navale, includono l'induzione di ritardi nell'attuazione di altre azioni volte ad abbattere le emissioni, l'uso attuale delle tecnologie di stoccaggio geologico della CO₂ per attività di "enhanced oil recovery" e gli interrogativi relativi alla responsabilità finanziaria e alla giustizia intergenerazionale legati alla necessità di garantire lo stoccaggio geologico in sicurezza per tempi molto lunghi, assimilabili al caso delle scorie nucleari.

Sistemi di propulsione alternativi

I sistemi di propulsione alternativi per il trasporto aereo sono incentrati sull'elettricità o sull'idrogeno e offrono opportunità di ridurre significativamente l'emissione di gas serra e altri inquinanti atmosferici alle seguenti condizioni:

- che l'efficienza dei sistemi propulsivi sia comparabile o migliore di quella attuale;
- che l'energia sia prodotta, sul ciclo di vita, con contenuto di carbonio inferiore rispetto agli attuali combustibili per aviazione.

Soluzioni di questo tipo si possono anche accompagnare **a cambiamenti profondi della forma dei velivoli**, per ospitare il diverso combustibile/vettore. Si tratta tuttavia di opzioni lontane da un'applicazione estesa su scala commerciale, che al momento è difficile prevedere possa avvenire prima del 2035.

Prospettive di sviluppo per l'aviazione elettrica

Gli **aerei elettrici** possono contribuire a migliorare l'efficienza e la diversificazione energetica, ma il loro sviluppo richiede un aumento considerevole della densità energetica delle batterie. Per questa ragione, hanno un **potenziale limitato a tratte brevi** e, specie inizialmente, a velivoli di piccole dimensioni. Un aereo completamente elettrico con un raggio operativo attorno ai 900 km e una capacità di 150 passeggeri richiederebbe batterie con una densità energetica più che quadrupla rispetto alle attuali

batterie al litio (circa 800-820 Wh/kg⁹⁰, rispetto a circa 180 Wh/kg attuali⁹¹, per un pacco batterie). Valori inferiori possono essere tecnicamente percorribili per l'elettificazione di velivoli più piccoli (come quelli per l'aviazione regionale) e/o su distanze più brevi.

Il potenziale di decarbonizzazione dell'aviazione elettrica dipende dalla sua capacità di eliminare gli effetti indiretti delle emissioni di CO₂, fermo restando che si deve anche tenere conto delle diverse opzioni di generazione elettrica. In generale, i velivoli elettrici hanno la capacità di ridurre l'effetto serra rispetto all'uso di idrocarburi, specie se si prendono in considerazione gli effetti indiretti del settore sul riscaldamento globale, come quelli legati alla formazione di cirri (nuvole)^{92, 93}.

In prospettiva, una transizione all'aviazione elettrica in Europa potrebbe pertanto portare benefici netti importanti per la decarbonizzazione, specie se l'intensità carbonica della produzione elettrica continuerà a calare, ma richiederebbe allo stesso tempo la disponibilità, a basso costo e larga scala, di batterie che sono attualmente ancora a livelli di sviluppo tecnologico basso (e che rispondono al momento alle sole necessità dell'elettificazione del trasporto su gomma). Tuttavia, nelle attuali condizioni di mercato, **i velivoli elettrici per l'aviazione commerciale non saranno convenienti economicamente al di là del trasporto regionale e altre applicazioni di corto raggio**. Tutto questo a meno di cambiamenti ancora più radicali nei prezzi dell'energia fossile rispetto a quelli già osservati negli ultimi mesi del 2021 e inizio 2022, nella tassazione del carbonio, nei tempi di sviluppo di tecnologie delle batterie e nei loro costi.

È ragionevole aspettarsi possibili sviluppi per applicazioni elettriche più leggere, come il trasporto merci a corto raggio. Nella migliore delle ipotesi, l'aviazione elettrica potrebbe eventualmente iniziare a coprire il trasporto regionale di breve distanza, e comunque con impatti minori sulla domanda totale di energia del settore, pur permettendone una maggiore diversificazione.

Un'applicazione con prospettive promettenti e allineate con le tecnologie legate all'elettificazione riguarda tutte le **attività di servizio ai velivoli a terra**, grazie a sviluppi nel trasporto su gomma (v. Capitolo 2).

⁹⁰ Gnadt et al. (2019), *Technical and environmental assessment of all-electric 180-passenger commercial aircraft*, [<https://doi.org/10.1016/...>], Bills et al. (2020), *Performance Metrics Required of Next-Generation Batteries to Electrify Commercial Aircraft*, [<https://doi.org/10.1021/acsenergylett.9b02574>].

Schäfer et al. (2018), *Technological, economic, and environmental prospects of all-electric aircraft*, [<https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/126682>].

⁹¹ Argonne National Laboratory (2021), The U.S. department of energy vehicle technologies office and national aeronautics and space administration joint assessment of the R&D needs for electric aviation, [<https://icati.org/...>].

⁹² Lee et al. (2021), *The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018*, [<https://doi.org/10.1016/...>].

⁹³ La soglia del risparmio netto nelle emissioni dirette di CO₂ per aerei elettrici con batterie da 800 Wh/kg, 150 passeggeri ed una distanza massima di 900 km, rispetto a velivoli convenzionali di capacità paragonabili, è stata stimata a 350 g CO₂/kWh se si considerano solo gli effetti diretti delle emissioni di CO₂, e 1000 g CO₂/kWh per la generazione elettrica (comparabile ad una centrale a carbone) se si considera un fattore 3 per gli effetti indiretti.

Aerei a idrogeno

Come per tutti gli altri mezzi di trasporto discussi in precedenza, i velivoli possono utilizzare l'idrogeno come combustibile in un motore a reazione o come vettore in una cella a combustibile per alimentare un motore elettrico. Come combustibile, l'idrogeno può essere usato assieme ad altri idrocarburi, con adeguati sistemi di iniezione in camera di combustione. Bruciare idrogeno puro limita l'emissione di inquinanti atmosferici, in particolare ossido di zolfo (SO_x) e particolato, ma può portare a significative emissioni di ossidi di azoto (NO_x). La combustione di idrogeno comporta un rilascio di vapore acqueo sostanzialmente maggiore rispetto ai combustibili tradizionali e ciò può causare la formazione di scie e cirri indiretti che, su larga scala, potrebbero produrre effetti radiativi forzanti sul bilancio termico terrestre.

L'elevata energia specifica dell'idrogeno lo rende nettamente preferibile alle batterie, ma per essere volumetricamente compatibile con un velivolo esso deve essere utilizzato in forma liquida (-252 °C). In questa forma, l'energia *per unità di peso* è oltre tre volte maggiore rispetto a quella del cherosene, un vantaggio che si riduce se si considera il peso del serbatoio criogenico del carburante, necessariamente prodotto con materiale speciale. D'altro canto, però, la densità di energia *volumetrica* dell'idrogeno liquido risulta essere un terzo rispetto a quella del cherosene, **richiedendo quindi serbatoi di carburante più grandi nei velivoli a idrogeno rispetto a quelli dei velivoli attuali** (e quindi costi indiretti legati alla riduzione del carico pagante).

L'uso di idrogeno liquido potrebbe consentire rifornimenti più rapidi rispetto ad aerei completamente elettrici, ma a costi maggiori⁹⁴. Lo stoccaggio criogenico è anche inevitabilmente soggetto a perdite, nonostante l'isolamento termico, poiché la differenza di temperatura tra l'ambiente esterno e il liquido è relevantissima sia a terra che in volo. Ciò può anche avere impatti sul clima, specie con emissioni ad alta quota. Riguardo alla necessità di materiali speciali per il trasporto e lo stoccaggio di idrogeno liquido, per limitare i problemi di infragilimento e le perdite, vale quanto indicato per il trasporto navale. **I costi di manutenzione di un'infrastruttura di gestione dell'idrogeno liquido negli aeroporti e sugli aeromobili sarebbero inevitabilmente molto più alti rispetto ai combustibili liquidi e all'elettrificazione.**

La complessità dello stoccaggio criogenico e, più in generale, dell'uso di idrogeno come vettore energetico è anche soggetta a importanti **sfide per la sicurezza**. Queste sono particolarmente rilevanti in aviazione, dove oltretutto non è possibile contare su un'esperienza paragonabile a quella accumulata con altri combustibili, al fine della gestione dei rischi.

Anche se i problemi di distribuzione, manutenzione, stoccaggio e sicurezza (e relativi costi) dovessero essere risolti, **la bassa densità energetica per unità di volume dell'idrogeno richiederebbe profondi cambiamenti nella progettazione dei velivoli**, prevedendo ad esempio serbatoi nella fusoliera e/o configurazioni con ali e fusoliera in corpo unico (*blended wing body*).

Nonostante queste sfide – e nell'ambito di una strategia finalizzata all'accesso a fondi pubblici per sviluppare tecnologie all'avanguardia – Airbus ha recentemente presentato tre concetti di velivoli a emissioni dirette zero, tutti basati sull'idrogeno, sostenendo che

⁹⁴ Lo stoccaggio criogenico richiede un profondo raffreddamento della linea di trasferimento del carburante e l'istituzione di un "canale freddo" che aumenta la complessità delle operazioni di rifornimento e porta a ulteriore dispendio di energia.

potrebbero entrare in servizio (ottimisticamente, data la necessità di certificazioni di sicurezza e la mancanza di esperienza relativa all'uso dell'idrogeno in aviazione, al di là di applicazioni usate nell'aerospazio) entro il 2035. Anche in caso di successo, **questo tipo di velivoli sarebbe limitato a servizi su tratte inferiori a 2000 km e con capacità inferiore a 150 passeggeri**. Come nel caso dell'aviazione elettrica, ciò avrebbe impatti minori sulla domanda totale di energia del settore, poiché la grande maggioranza di questa domanda è associata a **distanze maggiori e aerei più grandi, per le quali, come detto, l'opzione dei SAF risulta quella preferibile**.

Dal punto di vista delle emissioni, e in analogia con quanto discusso per il settore marittimo, per garantire una riduzione delle emissioni di gas serra la produzione di idrogeno deve essere basata su elettricità decarbonizzata (idrogeno "verde") o, se si rivelano efficaci, tecnologie di stoccaggio della CO₂ (idrogeno "blu"). Usare idrogeno prodotto da fonti fossili, attualmente usate per la quasi totalità della sua produzione, porterebbe a emissioni superiori rispetto all'uso diretto dei combustibili fossili in aviazione.

Priorità per la decarbonizzazione del settore

In conclusione, le priorità per la decarbonizzazione dell'aviazione sono analoghe a quelle discusse per il trasporto marittimo e includono:

- **sviluppo di tecnologie capaci di incrementare l'efficienza energetica;**
- **elettrificazione delle attività di terra** (e il relativo sviluppo di infrastrutture di accesso all'elettricità decarbonizzata come vettore energetico);
- **sviluppo di motori capaci di utilizzare diversi combustibili;**
- avvio e sviluppo di **programmi di sperimentazione** che consentano di abbattere i costi di produzione di *sustainable aviation fuels* (SAF), compresi biocombustibili avanzati e idrocarburi sintetici decarbonizzati;
- sviluppo di ulteriori **progetti di ricerca, sviluppo, dimostrazione diffusione in scala relativi ad aviazione elettrica e velivoli alimentati da idrogeno decarbonizzato**.

Come nel caso delle navi, le misure orientate verso l'accelerazione dell'innovazione (ricerca, sviluppo, dimostrazione e attuazione su scala crescente) dovrebbero essere realizzate in cooperazione con l'industria e potrebbero essere finanziate con fondi pubblici e/o con le entrate della tassazione sul carbonio. Anche nel caso dell'aviazione, va preso in considerazione il fatto che la cattura e lo stoccaggio del carbonio può fare leva sui profitti della produzione degli idrocarburi e non è quindi una priorità per i finanziamenti pubblici. Ogni iniziativa dovrebbe essere **coerente con la strategia industriale europea** (a cui la strategia italiana andrebbe allineata) che include, tra gli altri, l'alleanza sull'idrogeno pulito e quella sui combustibili rinnovabili a basso contenuto di carbonio.



6. Costi e potenziale delle diverse strategie di decarbonizzazione dei trasporti

Costi di abbattimento e potenziale di riduzione delle emissioni e di consumi di energia

Riprendendo un tema già discusso nei capitoli precedenti e con l'obiettivo di approfondire la fattibilità economica di diverse opzioni di decarbonizzazione dei trasporti, in questo capitolo vengono fornite ulteriori e più dettagliate stime del costo totale di proprietà per veicolo di trasporto su gomma di persone e merci, considerando l'importanza di questi settori in termini di emissioni di gas serra.

Una delle principali preoccupazioni dei consumatori, quando si parla di auto elettriche, è quella di avere costi superiori rispetto a un veicolo a benzina o a diesel. Questo non è sempre vero e dipende da molteplici condizioni, come la dimensione del veicolo considerato, l'utilizzo che si fa di esso e l'intensità emissiva del sistema elettrico nazionale. Per valutare la convenienza di questo tipo di investimento nel settore mobilità, uno dei metodi più utilizzati è quello di calcolare il *Total Cost of Ownership (TCO)*, che offre una valutazione del costo complessivo di possedere e utilizzare una macchina per tutta la sua vita utile. Il TCO include sia il costo di acquisto (CAPEX), che il costo di utilizzo (OPEX) delle vetture, oltre ad eventuali sussidi ed incentivi. Pertanto, il TCO dipende anche dai costi dell'energia, in particolare dei prodotti petroliferi per i motori a combustione, dell'elettricità per le macchine a batteria e per l'idrogeno per quelle a celle combustibili.

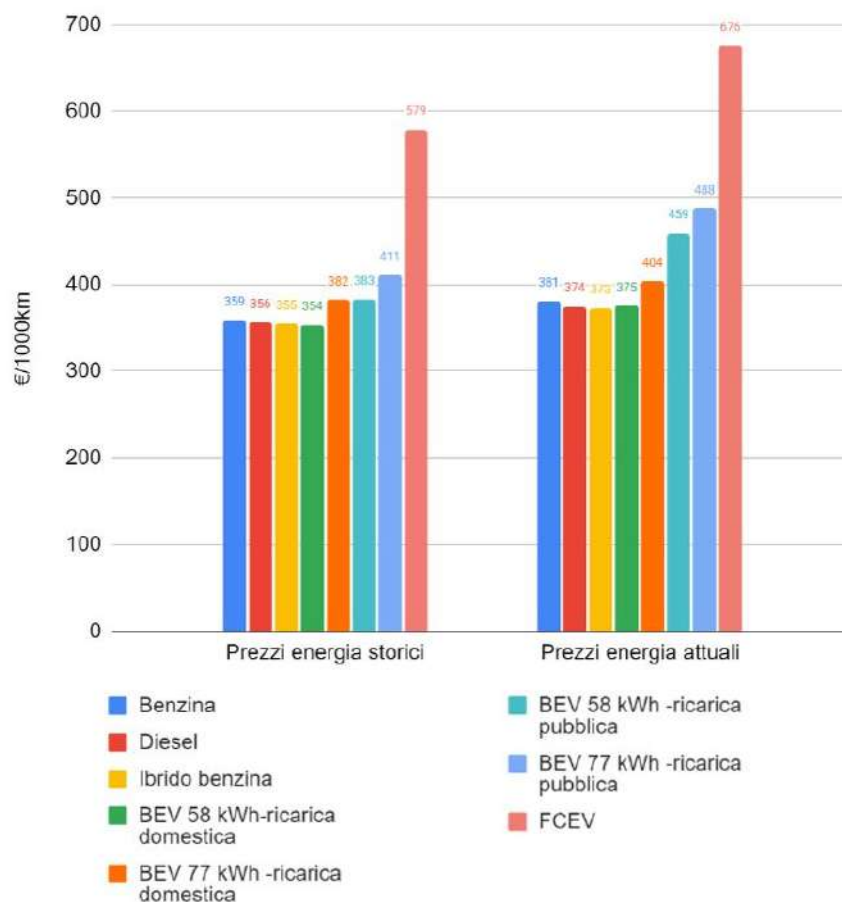
La **Figura 6** mostra il TCO stimato per diversi tipi di vetture private, con due scenari di prezzi dell'energia in linea con i valori storici (1,6 €/l benzina, 0,21 €/kWh elettricità domestica, 0,4 €/kWh ricarica pubblica; per l'idrogeno sull'ipotesi ottimistica di 5 €/kg

H₂) e con i recenti shock di prezzi (2 €/l benzina, 0,25 €/kWh elettricità domestica, 0,8 €/kWh ricarica pubblica; per l'idrogeno sui prezzi di 13 €/kg H₂). Si ipotizzano poi: 15.000 km/anno e una vita dell'auto di 10 anni, l'assenza di incentivi e un tasso di deprezzamento uniforme per tutti i tipi di motorizzazione. Ovviamente, molti sono i fattori di incertezza e di variabilità rispetto al modo d'uso, pertanto queste stime devono essere considerate indicative di un *range* di costo più che puntuali.

Figura 6: Total cost of ownership per veicoli passeggeri in base alla tipologia di alimentazione 2020

BEV = veicolo a batteria; FCEV: veicolo a idrogeno con cella a combustibile

TCO veicoli passeggeri 2020

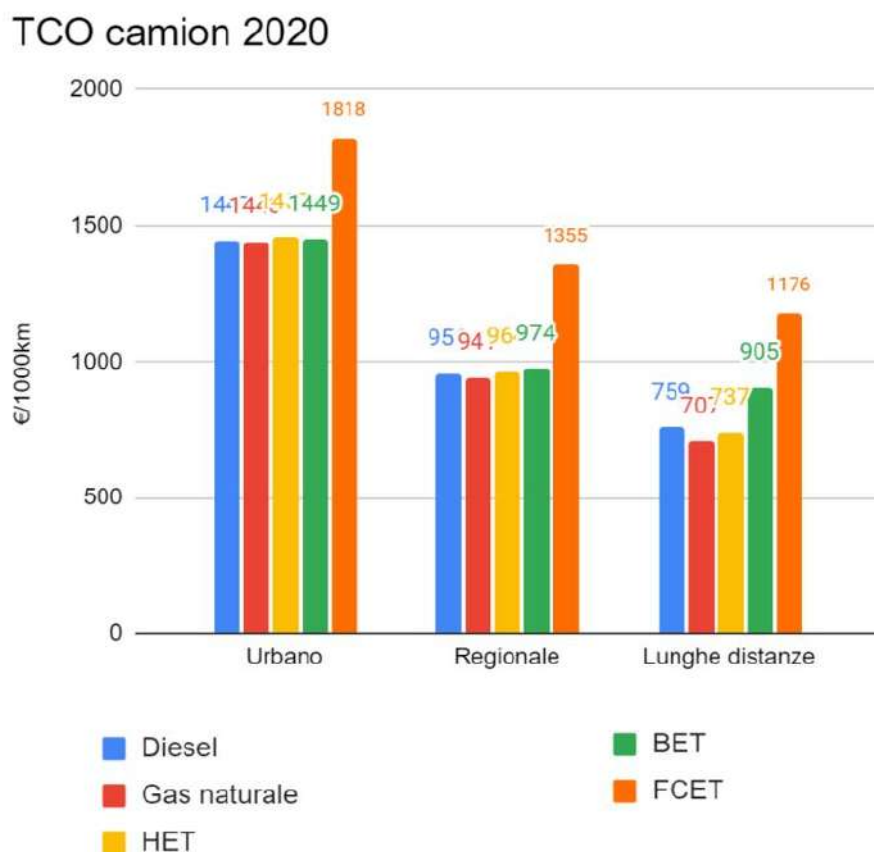


Come si può notare, **i veicoli elettrici hanno costi totali di ownership prossimi a quelli tradizionali a combustione interna per questo segmento auto, in entrambi gli scenari di prezzi dell'energia.** In alcuni casi, come quello di una batteria di dimensioni medie e di ricarica per lo più domestica (80%), il TCO dei veicoli elettrici è competitivo con quello dei veicoli tradizionali. Il modo di ricarica e la dimensione della batteria sono importanti determinanti del prezzo, ma in generale i veicoli elettrici sono molto competitivi, a differenza di **quelli a celle a combustibile**

con idrogeno, i quali costano tra il 60% e l'80% in più delle macchine a combustione interna.

Il calcolo del TCO può essere fatto anche per il trasporto merci (**Figura 7**). In questo caso si può prendere a riferimento un recente articolo che lo ha stimato per tutti i paesi europei, compresa l'Italia⁹⁵. Come nel caso delle auto, sono stati eliminati i sussidi nell'ottica di un paragone equo.

Figura 7: Total cost of ownership (TCO) per camion in base alla tipologia di alimentazione 2020. HET, BET e FCET indicano rispettivamente automezzi ibridi, a batteria e a idrogeno (celle a combustibile)



Per quanto esistano impatti legati alla frequenza di utilizzo delle infrastrutture di trasporto, distribuzione e rifornimento di energia (che non sono le stesse per le diverse motorizzazioni), i risultati evidenziano che **anche per i camion le alternative elettriche sono competitive con quelle tradizionali. Questo è particolarmente vero per i settori a breve-media percorrenza urbani e regionali, mentre per le lunghe distanze i motori a combustione rimangono al momento quelli più convenienti**, a meno che non siano introdotti appositi incentivi sull'acquisto e l'utilizzo o soluzioni tecnologiche che consentano di ridurre la taglia delle batterie senza limitare

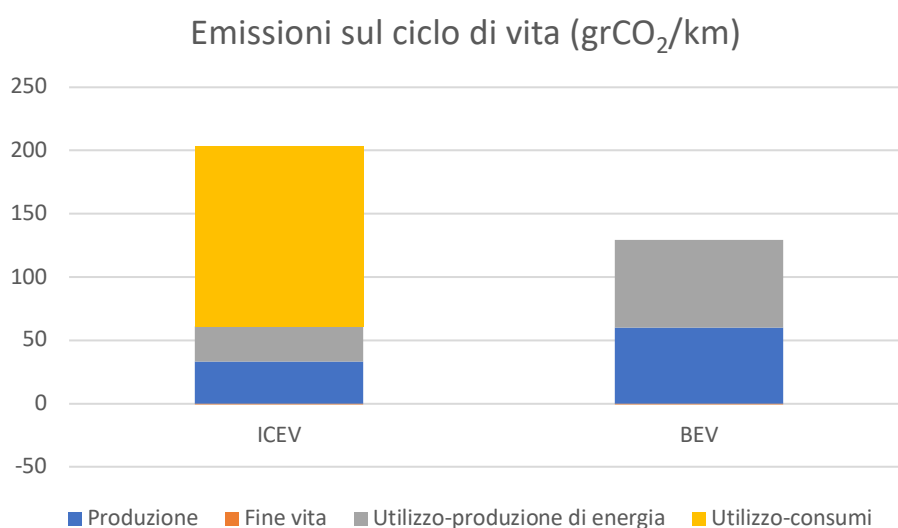
⁹⁵ Noll et. Al (2022), [\[https://www.sciencedirect.com/...\]](https://www.sciencedirect.com/...).

altri aspetti (in particolare i tempi di approvvigionamento energetico), come i sistemi di autostrade elettrificate (ERS) o *battery swapping* discussi nel Capitolo 2. Anche in questo caso, **le alternative a idrogeno risultano decisamente più costose.**

In aggiunta alle questioni legate al costo, le tecnologie di decarbonizzazione devono assicurare effettive riduzioni di emissioni di gas serra. Nell'ambito della transizione energetica viene spesso posta la questione della reale efficacia dei veicoli elettrici nell'ottica di una riduzione delle emissioni di gas serra. Il metodo più utilizzato per valutare questo aspetto è l'analisi del ciclo di vita (*LCA, Life-Cycle Assessment*), che può essere effettuata con diverse modalità. La più completa comprende tutte le emissioni "*from cradle to grave*", ovvero dalla culla alla tomba. Ciò significa che vengono tenuti in considerazione tutti gli effetti della produzione di un veicolo a partire dall'estrazione dei materiali fino al trattamento al termine della vita utile.

La Figura 8 riporta le emissioni di CO₂ equivalenti sul ciclo di vita di un'auto a combustione ed una elettrica, secondo uno studio per l'Italia ⁹⁶. **I veicoli elettrici permettono di ridurre le emissioni di CO₂ del 37% rispetto ad un veicolo a combustione, anche quando si tenga conto delle maggiori emissioni che derivano dalla loro produzione** (60 contro 33 grCO₂-eq/km). Il risparmio di CO₂ sul ciclo di vita è previsto aumentare progressivamente con la decarbonizzazione dell'elettricità, arrivando alla metà di un veicolo a combustione al 2030. **Risultati analoghi in termini di riduzione di CO₂ si possono ottenere con veicoli a fuel cells e idrogeno**, a condizione che quest'ultimo sia prodotto da processi a basse emissioni. Tuttavia, la differenza di efficienza energetica tra auto elettriche e a idrogeno indica che **nel caso dell'idrogeno occorre una quantità totale di energia primaria ben superiore per offrire lo stesso servizio finale.**

Figura 8: Emissioni su ciclo vita veicoli ICEV - endotermici e BEV - a batteria, su base dati RSE e ulteriori elaborazioni STEMI



⁹⁶ Del Pero et Al, 2018, [<https://www.sciencedirect.com/science/...>].

Nel settore del trasporto pesante, i risparmi di CO₂ e l'efficienza energetica del passaggio all'elettrico sono ancora più consistenti considerata la maggiore rilevanza della fase di utilizzo rispetto a produzione e fine vita: in questo caso le stime prevedono che già a oggi un camion elettrico possa risparmiare fino al 70% delle emissioni sul ciclo di vita⁹⁷.

Relativamente a tutti gli ambiti presi in esame, va in ogni caso ricordato come, a fronte di un risparmio di CO₂ e di un miglioramento dell'efficienza energetica, i veicoli elettrici comportino altri impatti ambientali e di utilizzo delle risorse, dovuti alla forte intensità di metalli e altre risorse nella costruzione del *powertrain* (in particolare le batterie).

I costi degli investimenti infrastrutturali per l'elettrificazione del trasporto automobilistico

Le valutazioni di costo e riduzione di emissioni dei precedenti capitoli evidenziano come in molti casi l'elettrificazione dei trasporti terrestri (in particolare per il trasporto su gomma e su ferro) sia l'opzione tecnologica più matura e con maggiore potenziale. Le valutazioni tecnologiche devono però anche essere corroborate da una visione strategica e di sistema delle possibilità per la decarbonizzazione del singolo settore di trasporto.

L'utilizzo di modelli energetici permette di simulare e ottimizzare scenari futuri per raggiungere gli obiettivi di decarbonizzazione, individuando le soluzioni con il miglior costo-efficacia, che considerino le interazioni e le sinergie tra tutti i settori energetici. In particolare, RSE (Ricerca sul Sistema Energetico) ha sviluppato un sistema modellistico, incentrato sul modello TIMES_RSE, per valutare le possibili scelte ottimali per la decarbonizzazione di tutto il sistema energetico italiano. Lo scenario realizzato implementa le policy già messe in atto e gli obiettivi vincolanti in termini di efficienza, rinnovabili ed emissioni proposti nel pacchetto *Fit for 55* dalla Commissione europea, oltre che gli investimenti già programmati all'interno del PNRR.

Gli scenari coerenti col *Fit for 55* sviluppati da RSE e confermati anche dagli esercizi modellistici della Commissione europea sottolineano come nell'ambito delle auto private sia previsto un ruolo decisivo per le vetture elettriche (che nel settore privato sono previste eccedere i 6 milioni di unità al 2030, come illustrato in **Figura 9**), soluzione caldeggiata anche dall'analisi sviluppata nei precedenti capitoli. Nello scenario RSE, le auto ibride plug-in non risultano particolarmente rilevanti per la transizione, andando a ricoprire una parte ridotta della domanda privata di spostamento passeggeri.

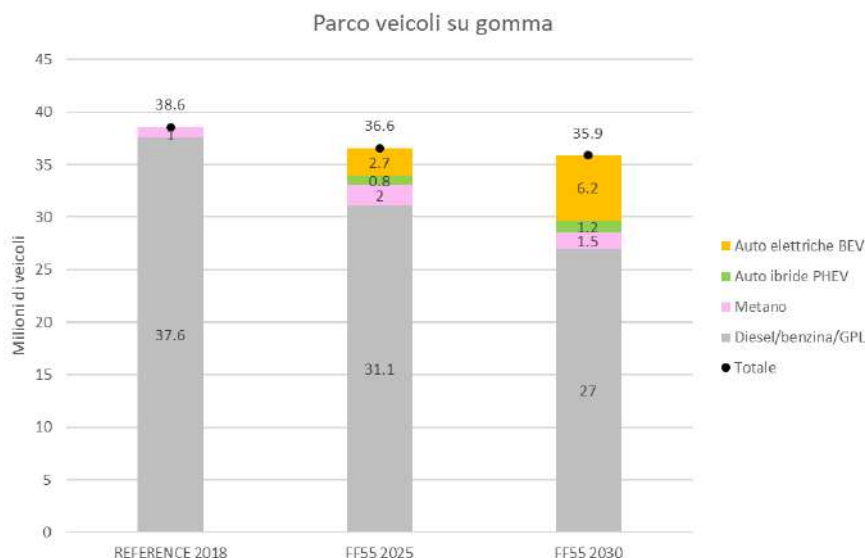
La penetrazione del vettore elettrico nel trasporto stradale, molto forte per auto, furgoni leggeri e autobus, si deve soprattutto alla riduzione delle emissioni del settore imposta dai diversi provvedimenti del pacchetto *Fit for 55*, che promuovono il ricorso a vetture sempre più efficienti e l'utilizzo di combustibili alternativi, oltre al vettore elettrico (nel caso dei PHEVs, questo richiederebbe la massimizzazione di *all-electric driving* e batterie più grandi di quelle attualmente in uso).

In aggiunta ai vincoli dettati dalle direttive Efficienza e RED III, incide particolarmente sui risultati dello scenario RSE il miglioramento delle prestazioni medie dei mezzi di

⁹⁷ Simons and Azimov, 2021, [<https://www.mdpi.com/1996-1073/14/11/3079>].

trasporto, dovuto in particolare alla modifica del Regolamento concernente i livelli massimi di emissione dei veicoli di nuova immatricolazione, che riguarda le auto e i veicoli commerciali leggeri. La riduzione delle emissioni del trasporto auto viene altresì trainata dalla riduzione della domanda legata allo *shift* modale dal trasporto privato verso quello pubblico e ciclopedonale.

Figura 9: Parco auto, scenari RSE



È evidente che una crescita così significativa del comparto elettrico deve essere accompagnata da investimenti infrastrutturali. Questi devono comprendere sia la decarbonizzazione del sistema di generazione elettrica che un adeguato investimento nella rete di ricarica dei veicoli; in entrambi i casi gli investimenti previsti avrebbero un ritorno durante la fase di utilizzo o produzione di elettricità con le tariffe.

Riguardo al settore elettrico, lo scenario *Fit for 55* di RSE prevede investimenti cumulati in questo decennio concentrati sulle fonti rinnovabili: **il solare e l'eolico, inclusi i sistemi di accumulo elettrochimico distribuiti, necessitano di 85 miliardi di euro rispetto ai 25 miliardi previsti da uno scenario benchmark senza *Fit for 55*.** L'aumento delle quote di produzione da fonti rinnovabili intermittenti, insieme con l'elettrificazione degli usi finali (in particolare pompe di calore e auto elettriche) richiede altresì un **rafforzamento della rete di trasmissione e di distribuzione, oltre a sistemi di accumulo, con investimenti cumulati fino al 2030 previsti in 37 miliardi di euro** (rispetto ai 22 miliardi che sarebbero stati comunque necessari nello scenario Base). D'altra parte, va considerato che **la riduzione dei consumi di combustibili fossili conseguente all'incremento delle fonti rinnovabili libererà rilevanti risorse economiche oggi versate in valuta pregiata all'estero** (la spesa media annuale per l'importazione di gas, petrolio e carbone è stata negli ultimi anni intorno ai 40 Mld €, ma ai prezzi attuali la spesa sarebbe più che doppia).

Le infrastrutture di ricarica richiederanno circa 3 miliardi di euro di investimenti al 2030. I dati RSE indicano che in Italia, a fine 2021, si contano circa 26.000 punti di ricarica pubblici e 13.200 infrastrutture (stazioni o colonnine) in 10.500 siti, mentre i sistemi di ricarica privati sono circa 24.000. Gli scenari di RSE prevedono un fabbisogno di ricarica pubblica per il 45% delle auto elettriche che saranno presenti

al 2030. **Ciò sottintende un'ipotesi di 3,6 milioni di punti di ricarica privati, distribuiti tra servizi residenziali e aziendali per lo scenario FF55. Sempre in questo scenario, saranno necessari inoltre 200.000 punti di ricarica pubblici.** In particolare:

- considerando che nelle autostrade italiane sono attualmente presenti 462 aree di servizio, RSE ipotizza di avere almeno 4 punti di ricarica "veloce" (indicativamente 100 kW) in ciascuna di esse, **ottenendo dunque 1.850 punti di ricarica veloce in autostrada;**
- le strade extraurbane si estendono per circa 177.000 km, con una distanza media tra stazioni di ricarica pari a 35-60 km. **Questo significa che saranno necessarie da 3.000 a 5.000 stazioni, con 2 o 4 punti di ricarica veloce ciascuna, sulle strade extraurbane,** per arrivare, in media, a 10.000 punti di ricarica *fast*, **e 20.000 nei centri urbani;**
- nelle città è inoltre importante prevedere dei **sistemi di ricarica convenzionale** (fino a 22 kW AC): la stima dello scenario FF55 di RSE è che questi possano essere **81.500 colonnine** munite di due punti di ricarica ciascuna.

I punti di ricarica possono essere integrati con sistemi di accumulo, che permettono di non gravare eccessivamente sulla rete elettrica o di installare stazioni di ricarica in punti dove la rete è "debole". Per questi utilizzi stazionari è possibile utilizzare batterie al litio di "second life", derivanti da veicoli elettrici ma non più idonee a tale uso, precedentemente sottoposte a processi di "grading" per verificarne lo stato di salute. Le stazioni di ricarica con sistemi di accumulo integrati possono anche prevedere l'installazione di impianti rinnovabili di generazione, per esempio fotovoltaici. Ciò permetterebbe di alimentare i veicoli elettrici con energia rinnovabile prodotta in loco e prevede un minor prelievo di energia dalla rete. Questa opzione è maggiormente indicata per contesti extraurbani e richiede ovviamente maggiori costi d'investimento iniziali.

La **Tabella 2** riassume le stime centrali sulla necessità di punti di ricarica coerenti con l'elettrificazione prevista nello scenario *Fit for 55* al 2030. Alcune di queste stime sono soggette a elementi di incertezza, come i fattori di carico e il fabbisogno pubblico. Ciononostante, si evidenzia la necessità di accelerare il percorso di installazione di stazioni di ricarica oltre le 21.000 già previste nel PNRR.

Tabella 2: Numero punti di ricarica stimati nello scenario coerente con gli obiettivi del pacchetto Fit for 55, scenari RSE

	Numero
Punti ricarica privati	3,6 milioni
Punti ricarica pubblici	31.850
<i>di cui: autostrade</i>	1.850
<i>di cui: strade extraurbane</i>	10.000
<i>di cui: nei centri urbani</i>	20.000
Punti ricarica lenta (centri urbani)	173.000

Il ruolo dell'innovazione e del progresso tecnico verso il 2030 e oltre

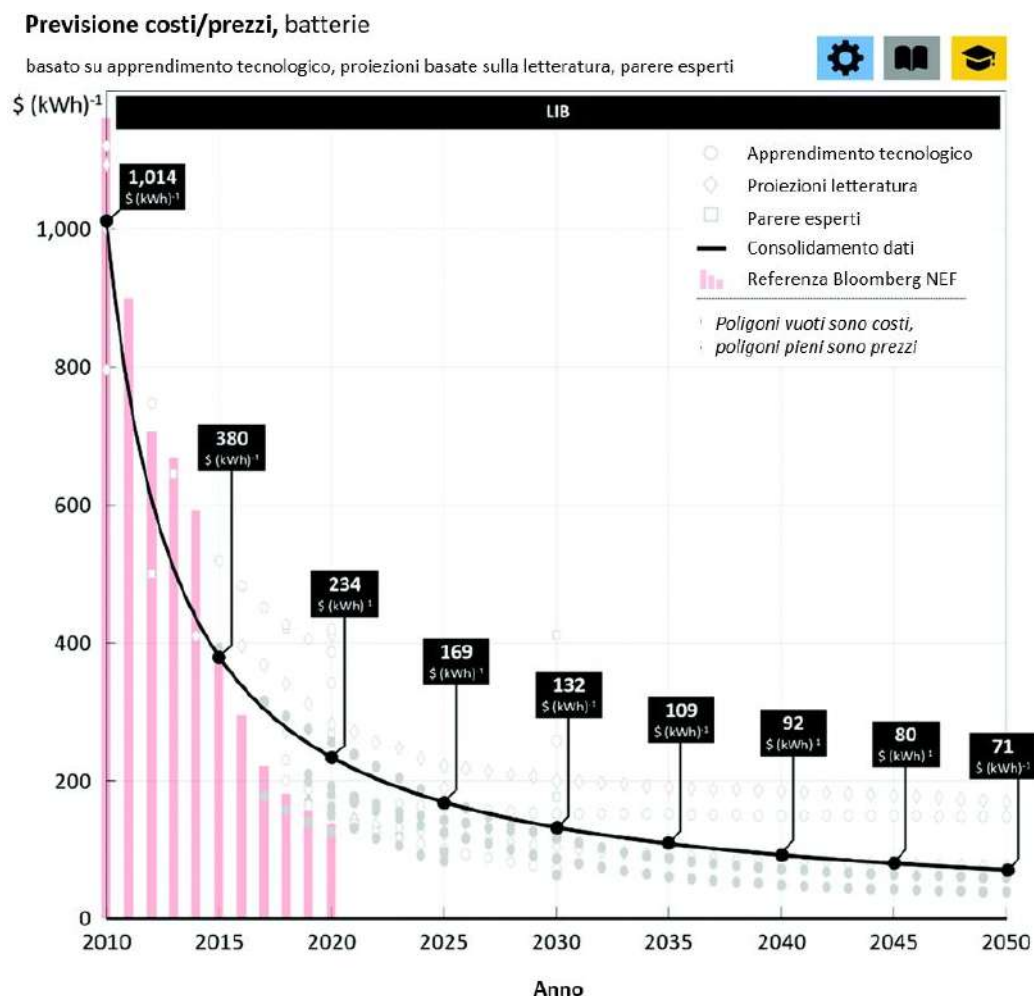
Le opzioni di decarbonizzazione del settore trasporto sono caratterizzate da profonde evoluzioni che devono essere considerate nel contesto di un processo pluridecennale di transizione ecologica. Ciò comprende non solo l'innovazione della mobilità, ma più in generale le trasformazioni dell'intero sistema energetico e socioeconomico. Infatti, come descritto nei precedenti capitoli, la decarbonizzazione del trasporto passerà da una decarbonizzazione del sistema di generazione elettrica, potendone diventare anche un fattore abilitante, soprattutto per quanto riguarda la stabilità della rete in presenza di alte quote di fonti intermittenti non programmabili. Sul lato della domanda, le innovazioni sociali e comportamentali – unite al progresso tecnico e accompagnate da adeguati investimenti infrastrutturali – possono offrire un notevole potenziale di riduzione delle emissioni del settore dei trasporti. Se nel settore della mobilità l'opzione di mitigazione dominante è il passaggio alla mobilità elettrica, la transizione a una mobilità attiva (non motorizzata) può fornire maggiori benefici per la salute, oltre ad alleviare la pressione di un rapido aumento dei veicoli elettrici.

Gli avanzamenti tecnologici, anche digitali, e il cambiamento della sensibilità pubblica sono fattori trainanti per le strategie di decarbonizzazione. Gli ultimi dieci anni hanno visto un calo drastico dei costi delle rinnovabili oltre ogni più rosea aspettativa, anche se in modo differente per diverse tecnologie. Il caso più eclatante è quello del fotovoltaico e dell'eolico, i cui costi – fino a qualche anno fa molte volte superiori ai fossili – sono ormai competitivi anche in assenza di sussidi.

Prevedibili ulteriori diminuzioni di costo renderanno le rinnovabili la soluzione più attraente per decarbonizzare il sistema elettrico, anche se occorreranno adeguati investimenti di rete e di stoccaggio per raggiungere gli obiettivi del *Fit for 55* e conseguire la neutralità climatica al 2050. **Simili straordinarie performance sono osservabili nel campo delle batterie, dove le riduzioni di costo di oltre l'80% negli ultimi 10 anni hanno sorpassato le previsioni sia modellistiche che degli esperti** (Figura 11), nonostante l'incremento dei prezzi delle materie prime possa avere un impatto tale da risultare in un aumento dei costi⁹⁸.

⁹⁸ Questo è un elemento che ha impatti sfavorevoli sul *total cost of ownership* (TCO) dei veicoli elettrici, ma che va anche valutato in un ambito nel quale i prezzi dei combustibili fossili sono in forte crescita (con impatti sfavorevoli per il TCO dei veicoli a combustione ed a idrogeno blu).

Figura 11: Evoluzione storica del costo delle batterie (in rosa) e proiezioni basate sugli studi (in grigio e nero). Rielaborazione basata su Mauler et. al (2021) - [\[Link\]](#)



Non tutte le tecnologie hanno beneficiato di *trend* analoghi. Per esempio, le centrali da fissione nucleare in Francia sono state caratterizzate da un aumento dei costi, risultando in curve di apprendimento con tassi negativi⁹⁹. Analogamente, un'altra opzione di mitigazione considerata necessaria per una decarbonizzazione completa, quella della cattura e stoccaggio della CO₂ (CCS), sta facendo fatica ad affermarsi al di fuori di applicazioni proprie del settore petrolifero, finalizzate all'aumento della produzione in pozzi già ampiamenti sfruttati – il cosiddetto *enhanced oil recovery*. Questa tecnologia

⁹⁹ Grubler, Arnulf. 2010. "The Costs of the French Nuclear Scale-up: A Case of Negative Learning by Doing." *Energy Policy*, Special Section on Carbon Emissions and Carbon Management in Cities with Regular Papers, 38 (9): 5174–88. [\[https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.05.003\]](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.05.003).

è in campo da circa tre decenni¹⁰⁰ ed esistono potenziali margini di guadagno nel settore *oil & gas*, tali da poterne finanziare lo sviluppo e l'applicazione anche in assenza di un prezzo specifico da attribuire allo stoccaggio della CO₂. Una delle ragioni di questi ritardi nello sviluppo della CCS è proprio quella dei costi paragonata alle alternative, almeno nel settore di generazione elettrica, dove le rinnovabili hanno fatto grandi progressi (diverso il discorso nel settore industriale).

La ragione per questo differenziato tasso di innovazione dipende dal contesto regolatorio ma anche dalle caratteristiche delle tecnologie. La modularità e granularità di tecnologie come le rinnovabili o le batterie sono associate a tassi di apprendimento maggiori (e profili di rischio minori per chi investe) rispetto alle tecnologie di grossa taglia, che per loro natura sono meno replicabili¹⁰¹. Inoltre, tecnologie che hanno bisogno di grandi investimenti infrastrutturali – come, ad esempio, l'idrogeno – diventano competitive solo quando i volumi raggiungono soglie critiche che giustifichino le infrastrutture stesse. Di conseguenza, alcune soluzioni rimangono in quella che è chiamata la 'valle della morte' dell'innovazione e non riescono a raggiungere sufficienti soglie di mercato.

Questa è una ragione chiave per cui vale la pena focalizzare l'attenzione su processi di produzione di idrogeno che hanno un potenziale significativo di abbattimento dei costi, anche per ragioni geografiche. Ciò può avvenire accoppiando la produzione a situazioni in cui già esiste una domanda su larga scala e in casi in cui occorre comunque investire per abbattere le emissioni di gas serra. È il caso, ad esempio, di grandi impianti chimici, raffinerie, della produzione di fertilizzanti e, in prospettiva, di acciaio decarbonizzato.

Queste considerazioni possono essere utili nell'analizzare le proiezioni di costo di alcune tecnologie chiave per la decarbonizzazione dei trasporti fino al 2030 (**Tabella 3**), che la letteratura tecnico-scientifica prevede in continua riduzione. L'ottimismo delle previsioni va però contestualizzato e può essere disatteso a causa di due fattori importanti:

- **il primo è il costo dei materiali.** Tutte le principali tecnologie di produzione e uso dell'energia hanno un utilizzo intensivo di materiali, spesso non facilmente disponibili in scala, anche perché non sono stati oggetto, sino a oggi, di investimenti massicci su estrazione e processi di conversione. Ad esempio, le batterie al litio dipendono da materiali critici come il litio stesso o (in molti casi, ma non tutti) il cobalto, i cui prezzi sono aumentati molto in seguito al forte aumento della domanda globale. L'estrazione di alcuni elementi – segnatamente il cobalto, la cui estrazione è attualmente concentrata nella Repubblica Democratica del Congo, talvolta con rischi di violazione dei diritti umani nei siti minerari – deve non solo aumentare, ma anche diversificarsi, promuovendo

¹⁰⁰ Dopo circa tre decenni e una consistente massa di investimenti pubblici e privati, le attività di CCS nel mondo immettono nel sottosuolo circa 40 milioni di tonnellate di CO₂ l'anno. Secondo l'IPCC, il CCS dovrebbe evitare l'immissione in atmosfera di una quota tra 2 e 20 miliardi di tonnellate di CO₂ l'anno per avere effetti tangibili sulla mitigazione climatica. Anche prendendo il limite inferiore, l'attuale livello di stoccaggio si aggira quindi attorno al 2% rispetto al minimo necessario. Il valore non è particolarmente incoraggiante se si considera che buona parte delle attività di CCS effettuano la *enhanced oil recovery* e il petrolio estratto emette CO₂ che non viene catturata. In altre parole, la quota di riduzione di emissioni nette raggiunta dal CCS è significativamente inferiore al 2% di cui sopra.

¹⁰¹ Wilson, C., A. Grubler, N. Bento, S. Healey, S. De Stercke, and C. Zimm. 2020. "Granular Technologies to Accelerate Decarbonization." *Science*, April. [<https://doi.org/10.1126/science.aaz8060>].

regole capaci di garantirne la produzione sostenibile. Questo è in linea con le proposte avanzate dalla Commissione europea nel caso del regolamento sulle batterie. Altre strategie fanno leva sullo sviluppo di tecnologie alternative, che richiedono minerali di più facile disponibilità e minor impatto ambientale e sociale;

- **il secondo è il costo infrastrutturale**, fondamentale per la distribuzione dell'idrogeno e per un suo ruolo nel trasporto. I costi di trasporto, distribuzione e rifornimento si aggirano sui 2-4 €/kg di H₂ e non sono previsti in calo se non in seguito a uno sviluppo molto forte del mercato o per distanze di trasporto dai siti di produzione molto ridotte. Pertanto, anche se i costi e le efficienze dell'elettrolisi e delle celle a combustibile dovessero migliorare significativamente, insieme ai costi delle rinnovabili, il costo dell'idrogeno decarbonizzato rimarrà presumibilmente nel *range* di 5-10 €/kg per tutto il prossimo decennio.

Questo confermerebbe che l'opzione dell'elettrificazione rimane a breve termine la più economica, almeno fino al 2030 e probabilmente oltre.

Tabella 3: Costi medi storici e in proiezione al 2030 di alcune tecnologie-chiave per la decarbonizzazione dei trasporti

Tecnologia	2010	2020	2030
Eolico onshore (LCOE, \$/MWh) Fonte: a	113	45	30 [17-42]
Eolico offshore (LCOE, \$/MWh) Fonte: a	158	80	54 [35-78]
Solare PV (LCOE, \$/MWh) Fonte: b	382	90	40
Batterie (LiB, \$/kWh) Fonte: c	1150	169	95
Elettrolisi (AEC, \$/kW) Fonte: d	1600	880	293-968

Fonte: a.[Link](#) ; b.[Link](#) ; c.[Link](#) ; d.[Link](#)

Nella corsa all'innovazione verde, una delle sfide principali sarà quella di **sviluppare innovazione in Italia**. Questo permetterebbe di mantenere i costi economici della transizione molto bassi o addirittura di ottenere guadagni di competitività¹⁰². La produzione interna è essenziale non solo per alleviare la potenziale pressione nel saldo

¹⁰² Paroussos, Leonidas, Kostas Fragkiadakis, and Panagiotis Fragkos. 2020. "Macro-Economic Analysis of Green Growth Policies: The Role of Finance and Technical Progress in Italian Green Growth." *Climatic Change* 160 (4): 591–608. [\[https://doi.org/10.1007/s10584-019-02543-1...\]](https://doi.org/10.1007/s10584-019-02543-1...).

della bilancia dei pagamenti, ma anche per aumentare l'occupazione e aumentare il PIL attraverso le esportazioni, che sono un fattore molto importante nel settore automotive italiano. Affinché questo avvenga, l'Italia deve riempire lo storico *gap* di investimenti in R&D rispetto ai suoi competitori, grazie a un approccio sistemico che valorizzi le imprese italiane di eccellenza. A tal fine occorrono politiche capaci di abbattere il profilo di rischio in investimenti in tecnologie innovative, come:

- **sovvenzioni a copertura parziale o totale degli interessi sugli investimenti privati per tecnologie ad alto potenziale** di abbattimento di emissioni e scalabilità;
- **supporto e co-investimento in progetti dimostrativi**, al fine di condividere il rischio tra settore pubblico e privato.

Al di là della fase iniziale della diffusione della tecnologia, il sostegno pubblico dal lato dell'offerta deve orientarsi verso la leva della domanda pubblica, gli incentivi economici e l'introduzione di strumenti regolatori, anche grazie alle politiche europee, in modo tale da consentire la mobilitazione di investimenti privati su più larga scala. Altri strumenti rilevanti includono gli **investimenti infrastrutturali per facilitare l'adozione diffusa di tecnologie efficaci, ad alta capacità di decarbonizzazione, scalabilità e abbattimento dei costi**, in linea con le indicazioni discusse in questo documento. Altre ancora includono crediti agevolati all'esportazione, più rilevanti in casi in cui i mercati più favorevoli allo sviluppo siano all'estero. Medesime politiche sarebbero importanti anche per mobilitare investimenti da parte di gruppi esteri in Italia.

Un esempio chiave in questo quadro è quello delle ***gigafactories* per la produzione di batterie**, al centro di sviluppi importanti in tutti i paesi europei che hanno un forte settore *automotive* con grandi impianti produttivi per veicoli o componenti che fanno parte della filiera. La mobilitazione di capitali per la costruzione di *gigafactories* necessita di adeguate infrastrutture per l'accesso a costi competitivi alle materie prime, della partecipazione di partner commerciali sul territorio nazionale (per assicurare che esistano prospettive concrete di incremento di domanda), nonché della presenza di una chiara visione sistemica di sviluppo. Quest'ultima comprende politiche volte a stimolare la domanda di batterie nel quadro del sistema industriale nazionale – attraverso la produzione di veicoli elettrici e altre applicazioni – e può trarre benefici importanti da un dialogo costruttivo tra governo e parti sociali, alla luce del carattere fortemente manifatturiero dell'industria italiana.

Altri esempi in linea con le indicazioni discusse in questo documento possono riguardare la produzione di componenti per la generazione elettrica eolica e solare, il rafforzamento della rete elettrica, le infrastrutture di ricarica dei veicoli elettrici e gli elettrolizzatori. Quest'ultima è specialmente rilevante in un quadro di sviluppo dell'idrogeno in aree geografiche ad alto potenziale, e quindi finalizzata all'esportazione.

7. Priorità tecnologiche

Sintesi delle strategie tecnologiche e delle loro priorità

All'esito di quanto riportato nei capitoli precedenti, **l'elettrificazione risulta in termini generali l'opzione tecnologica più promettente per diversi settori, sebbene non tutti**. Ciò è evidenziato nella **Tabella 4**, in cui è stata riassunta la valutazione complessiva di sei gruppi di opzioni tecnologiche di decarbonizzazione del settore dei trasporti.

Tabella 4: Valutazione delle diverse opzioni tecnologiche per diversi tipi di veicoli e distanze

Veicoli	Distanze	Tecnologia								
			Tutte	Tutte	Tutte	Brevi Lunghe	Brevi Lunghe	Brevi Lunghe	Brevi Lunghe	Brevi Lunghe
		Elettrificazione (batterie)	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta
		Elettrificazione (reti elettrificate)	Non prioritario	Non prioritario	Non prioritario	Alta	Alta	Alta	Non prioritario	Non prioritario
		Biocombustibili attuali	Non prioritario	Non prioritario	Non prioritario	Non prioritario	Non prioritario	Non prioritario	Non prioritario	Non prioritario
		Biocombustibili avanzati	Bassa	Bassa	Bassa	Bassa	Bassa	Bassa	Bassa	Bassa
		E-Fuels	Bassa	Bassa	Bassa	Bassa	Bassa	Bassa	Bassa	Bassa
		Gas naturale Biogas Biometano	Bassa	Bassa	Bassa	Bassa	Bassa	Bassa	Bassa	Bassa
		Idrogeno e Idrocarburi sintetici decarbonizzati	Bassa	Bassa	Bassa	Bassa	Bassa	Bassa	Bassa	Bassa

Alta priorità (tecnicamente fattibile, adeguato, economicamente competitivo)

Bassa priorità (tecnicamente fattibile ma poco adeguato, economicamente non ottimale)

Non prioritario (tecnicamente soggetto a restrizioni importanti, limitata competitività economica)

Incerto (attualmente tecnicamente ed economicamente soggetto a restrizioni ma con potenziale rilevante, necessaria ricerca)

Per quanto riguarda il trasporto passeggeri su strada (auto private, taxi, autobus per trasporto pubblico locale), i veicoli elettrici offrono i maggiori

vantaggi. Le auto BEV sono economicamente competitive con le auto ICE, mostrando già oggi un costo totale di possesso inferiore, soprattutto quando l'utilizzo è medio-alto (es. sopra 15-20.000 km/anno)^{103, 104}. Le valutazioni citate sono precedenti all'ondata di aumenti dei prezzi dell'energia elettrica e dei combustibili avvenuta in combinazione con l'invasione russa dell'Ucraina, ma nel medio periodo la maggiore frazione rinnovabile della produzione elettrica, oltre che l'atteso disaccoppiamento del prezzo dell'energia elettrica da quello del gas, dovrebbe portare a una diminuzione dei prezzi dell'elettricità.

Riguardo alle emissioni di CO₂, già col mix elettrico attuale questi veicoli consentono riduzioni di emissioni di oltre la metà, anche tenendo conto del ciclo di vita¹⁰⁵. Le emissioni diminuiranno ulteriormente grazie ai BEV in quanto è prevista una continua crescita della generazione elettrica decarbonizzata, in linea con gli obiettivi del *Fit for 55*. Il potenziale totale dell'elettrificazione in termini di riduzione delle emissioni è notevole, considerato il contributo alle emissioni italiane e il fatto che i veicoli – soprattutto quelli ad alto fattore di utilizzo – hanno *turnover* elevati se paragonati ad altri settori quali gli edifici, l'industria o la generazione elettrica, in cui gli investimenti hanno durata più lunga.

L'elettrificazione è la soluzione più conveniente anche per il trasporto merci con furgoni utilizzati in ambito cittadino e si andrà affermando nei prossimi anni con il crescere delle offerte di mezzi di trasporto semi-pesante *full-electric* che comportino tragitti giornalieri inferiori ai 400 km in ambiti di tipo regionale. La priorità del passaggio a elettrico di auto, furgoni, autobus locali e piccoli camion porta con sé anche un **miglioramento della qualità dell'aria a livello urbano** che produrrà notevoli vantaggi, anche economici, conseguenti al miglioramento dell'impatto sulla salute.

Per le maggiori distanze del trasporto pesante su gomma, se dal punto di vista di efficienza energetica la soluzione dell'elettrificazione risulta la migliore, in considerazione delle problematiche connesse ai tempi e alle infrastrutture di ricarica a oggi restano aperte diverse opzioni, quali:

- l'uso di punti di ricarica ad alta potenza (da associare in tutta probabilità a stoccaggio stazionario¹⁰⁶);
- l'elettrificazione delle autostrade;
- il *battery swap*;
- l'idrogeno (in particolare per soluzioni di tipo *hub and spoke*¹⁰⁷).

¹⁰³ Palmer, Kate, James E. Tate, Zia Wadud, and John Nellthorp. 2018. "Total Cost of Ownership and Market Share for Hybrid and Electric Vehicles in the UK, US and Japan." *Applied Energy* 209: 108–19. [<https://doi.org/...>].

¹⁰⁴ Noll, Bessie, Santiago del Val, Tobias S. Schmidt, and Bjarne Steffen. 2022. "Analyzing the Competitiveness of Low-Carbon Drive-Technologies in Road-Freight: A Total Cost of Ownership Analysis in Europe." *Applied Energy* 306: 118079. [<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118079>].

¹⁰⁵ Bieker, Georg, 2021. "A global comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of combustion engine and electric passenger cars", White Paper, International Council of Clean Transportation. [<https://theicct.org/wp-content/uploads/...>], P. Wolfram, S. Weber, K. Gillingham, E. G. Hertwich, *Nat. Commun.* 2021, 12, 7121, [<https://www.nature.com/...>].

¹⁰⁶ Tramite batterie posizionate vicino ai punti di ricarica.

¹⁰⁷ Che gravitano attorno ad una base logistica principale.

Bisognerà impegnarsi **in tempi brevi in una approfondita discussione con i partner europei, l'industria e gli stakeholder** per identificare le soluzioni e definire un programma di attuazione continentale.

Nei settori citati le alternative all'elettrificazione – come il gas naturale, i biocombustibili, l'idrogeno e gli idrocarburi sintetici – risultano quindi in linea generale meno attraenti. Per il gas naturale, la crisi ucraina ha messo prepotentemente in luce la fortissima dipendenza dell'Italia e dell'Europa dall'importazione dalla Russia e da altri Paesi che presentano alti profili di problematicità. Per questo motivo si ritiene che l'impiego del gas naturale debba essere prioritariamente indirizzato verso utilizzi obbligati – come per certi impieghi industriali che prevedono combustioni ad alta temperatura o per il riscaldamento civile. L'impiego in autotrazione, già oggi fuori mercato a causa dei costi, non deve essere posto in priorità anche perché permette riduzioni di emissioni limitate, specie quando si tiene conto delle emissioni e delle perdite lungo la catena di approvvigionamento e il rischio di rilascio in atmosfera come incombusto.

I biocombustibili di prima generazione da colture dedicate hanno impatti sul territorio e rischiano di competere con gli usi agricoli, con ripercussioni sui prezzi del cibo, mentre quelli di seconda generazione hanno limitazioni di approvvigionamento di materie prime (biomasse sostenibili) e scala (necessità di raccogliere biomasse su vasti territori). L'idrogeno decarbonizzato ha costi ancora molto alti e richiede una complessa infrastruttura che rischia di limitare la prevista riduzione dei prezzi dovuta al progresso tecnologico dei prossimi anni (come discusso nei Capitoli 2, 3, 4, e 5), mentre i cosiddetti *e-fuels* presentano sulla carta problemi di efficienza e, di conseguenza, anche di costo.

Queste stesse alternative tecnologiche possono tuttavia svolgere un ruolo in settori in cui l'elettrificazione, per sua natura, non può arrivare. La Tabella 4 evidenzia, in particolare, come **per il settore del trasporto aereo e anche marittimo di lunga distanza l'elettrificazione non sia una strategia utilizzabile.** In questi settori, le alternative come i combustibili di seconda generazione offrono invece soluzioni tecnicamente valide, anche in relazione ai consumi complessivamente limitati se paragonati al trasporto su strada e alle possibilità di miscelazione con combustibili di derivazione petrolifera senza costi aggiuntivi significativi.

Nel caso del trasporto marittimo (così come nelle modalità terrestri), il biogas/biometano è tecnicamente possibile, ma compete (v. Capitolo 3) con la domanda in altri settori, in particolare industrie che richiedono calore ad alte temperature e generazione elettrica in centrali turbogas. Inoltre, il biogas/biometano è anche soggetto a barriere economiche legate alla convenienza al suo utilizzo in prossimità dei luoghi di produzione e nella rete dei metanodotti esistente. Questo ne limita l'applicazione nei trasporti, specie nelle navi, particolarmente nei casi in cui occorra costruire una nuova infrastruttura di distribuzione del combustibile¹⁰⁸.

L'idrogeno e i combustibili sintetici possono contribuire alla riduzione delle emissioni del settore marittimo e dell'aviazione, ma solo se verranno sviluppati – in Italia e all'estero – su una scala sufficientemente grande da abbatterne i costi e

¹⁰⁸ Da notare inoltre che, inizialmente e per un periodo di tempo significativo, questa infrastruttura non potrebbe che essere rifornita – come accade oggi dove questa infrastruttura esiste – da metano di origine fossile e quindi senza un tangibile abbattimento delle emissioni di gas serra sul ciclo di vita.

aumentarne il potenziale. Occorrerà quindi osservare come evolverà il mercato dell'idrogeno in altre applicazioni, come quelle industriali, e se i costi di produzione si abbasseranno sostanzialmente, soprattutto in Paesi con elevata disponibilità di fonti rinnovabili a basso costo. In questo caso, le importazioni o le limitate produzioni nazionali potrebbero essere usate per ridurre le emissioni del settore del trasporto marittimo e dell'aviazione. L'impiego dell'idrogeno nei trasporti pesanti si prevede che possa avere solo uno sviluppo limitato a collegamenti tra hub logistici che metterebbe in dubbio la realizzazione di un'infrastruttura molto costosa, mentre potrà avere una limitata applicazione in campo ferroviario per tratte non elettrificate lunghe o che dispongano di idrogeno a basso costo nelle stazioni di testa.

Ciò premesso, **è comunque evidente che laddove possibile l'elettrificazione rimane l'opzione tecnologica più attraente nel breve periodo e l'unica che possa realisticamente permettere di raggiungere gli obiettivi del Fit for 55 del 2030**, considerati il livello di avanzamento tecnologico e il potenziale di sostituire mezzi più inquinanti. È necessario rimarcare come questa analisi consideri solo la tecnologia dal lato dell'offerta, **ma cambiamenti della domanda sono altrettanto importanti per assicurare che la decarbonizzazione sia sostenibile e inclusiva**. In particolare, a livello urbano, ma non solo, lo *shift* modale verso la mobilità dolce e il trasporto pubblico possono ridurre le emissioni e avere co-benefici per la salute e l'ambiente. L'analisi delle opzioni di mitigazione dal lato della domanda e per tipologia di mobilità sarà oggetto di analisi in prossimi rapporti.

Ripercussioni della sicurezza energetica per la decarbonizzazione dei trasporti

La crisi energetica e geopolitica attuale ha evidenziato la dipendenza del sistema energetico italiano dall'estero e l'urgenza di diversificare le fonti di approvvigionamento e di favorire l'indipendenza energetica basata sulle fonti rinnovabili, all'interno di una rafforzata collaborazione europea. Questa crisi ha importanti conseguenze anche per la decarbonizzazione del settore trasporto: il rapido aumento dei prezzi di gas e petrolio e più in generale di tutte le importazioni rende necessario dare priorità a strategie di decarbonizzazione che allo stesso tempo riducano i consumi energetici.

Tornando dunque centrale la questione dell'efficienza energetica, la priorità delle strategie delineate in questo rapporto diviene ancora più chiara. Trascurando la riduzione diretta di consumi tramite *shift* modale e altre misure comportamentali come il tele-lavoro – che saranno oggetto di future analisi e non sono state trattate nel presente documento –, **risulta evidente come l'opzione dell'elettrificazione è quella che maggiormente offre il doppio beneficio di risparmio energetico e riduzione delle emissioni**. Come segnalato nel Capitolo 6, l'efficienza di un'auto elettrica è di almeno tre volte maggiore di quella di una a combustione interna.

Come si può osservare dalla tabella che segue (Tabella 5), l'impiego di 1 TWh/anno di elettricità rinnovabile in mezzi elettrici permette di far muovere un numero di veicoli quasi triplo (oggi) e potenzialmente quasi quadruplo al 2050 rispetto all'equivalente energetico in combustibili fossili utilizzato nel parco circolante attuale. La tabella mostra inoltre il notevole vantaggio dell'opzione BEV rispetto alle auto a idrogeno e celle a combustibile.

Con un parco auto elettriche di 6 milioni e le altre misure coerenti con il *Fit for 55*, gli scenari per il 2030 prevedono una riduzione dei consumi finali di petrolio nel settore trasporto del 36%. Questo si traduce in un risparmio di 13 Mtep-anno di petrolio dal solo settore trasporto. L'Italia è l'ottavo paese al mondo per importazioni di petrolio, con circa 48 Mtep annui che si traducono in una spesa di circa 25 miliardi di euro all'anno, di cui quasi 4 miliardi verso la Russia. Una riduzione dei consumi di questa portata eliminerebbe la dipendenza dalla Russia e il costo delle importazioni, anche se con esse sarebbero neutralizzate le accise derivanti dalla vendita (si veda sotto per una discussione).

L'elettrificazione del settore trasporto al 2030 si tradurrebbe in un aumentato consumo finale di elettricità di solo 1,2 Mtep, molto inferiore al risparmio di petrolio e comunque tale da essere coperto da nuovi impianti rinnovabili e non da un aumento di importazioni di gas. Va infatti ricordato che per raggiungere gli obiettivi del *Fit for 55* gli scenari prevedono una riduzione di un terzo del gas nel parco elettrico e la completa rinuncia al carbone, a fronte di una crescita della generazione da solare ed eolico di due volte e mezzo all'attuale.

Tabella 5: Numero di mezzi alimentabili con 1TWh/anno di energia elettrica rinnovabile o con l'equivalente energetico di combustibili fossili ed emissioni generate o evitate¹⁰⁹.

TTW= tank-to-wheel, cioè dal serbatoio alle ruote

Tipo di auto (anno di costruzione e prevista evoluzione)	N° automobili (classe C) alimentabili con l'equivalente energetico di 1 TWh/anno	Emissioni TTW prodotte/evitate (MtCO ₂ e)
ICE (2022)	145.000	0,27
BEV (2022)	425.500	-0,78
BEV (2030)	486.000	-0,89
BEV (2050)	567.000	-1,04
HFCEV (2022)	152.000	-0,28
HFCEV (2050)	207.000	-0,38

Se il vantaggio dell'elettrificazione per l'indipendenza energetica è chiaro dai numeri appena citati, lo è meno per le altre principali opzioni di riduzione delle emissioni dei trasporti. Il gas naturale, come già detto, non è compatibile con la

¹⁰⁹ Per il calcolo si è considerata una percorrenza media annua di 11.750 km/anno, con il consumo medio del parco auto ICE di 6,45 l/100km (benzina/gasolio), un consumo medio BEV di 200 Wh/km (2022), 175 Wh/km (2030) e 150 Wh/km (2050) e un'efficienza media delle auto HFCEV (prodotto di efficienza dell'elettrolizzatore, della cella a combustibile e del sistema batterie/motore elettrico) di 0,3575 (2022) e di 0,4875 (2050). Si è fatto il confronto soltanto con un'auto ICE media al 2022 in quanto si immagina che gli avanzamenti tecnologici nei prossimi anni saranno concentrati sul settore elettrico a batteria o a celle a combustibile. Non si è considerata l'ipotesi di idrogeno "verde" impiegato in motori a combustione interna a causa della forte inefficienza. TTW= Tank To Wheel.

riduzione della dipendenza energetica, oltre a produrre dubbie riduzioni delle emissioni. Anche le opzioni biologiche, come biocombustibili, biogas e biometano, sono a rischio di potenziale conflitti con la possibile necessità di incrementare l'utilizzo di terreni arabili per colmare il *gap* di importazioni di cereali provenienti da Ucraina, Bielorussia e Russia. Infine, anche l'idrogeno è influenzato dalle politiche di sicurezza energetica: l'idrogeno blu dipende dal gas naturale e per via della sua bassa efficienza è particolarmente incompatibile con l'indipendenza. Quello verde pone anch'esso dei problemi, in quanto almeno nei prossimi anni le fonti rinnovabili dovranno essere dedicate a rimpiazzare il gas nella generazione di elettricità, e la produzione di idrogeno verde in Italia sarà necessariamente limitata all'utilizzo dell'*overgeneration*, da utilizzare prioritariamente per progetti di decarbonizzazione di processi industriali dove già esiste domanda di idrogeno (chimica, fertilizzanti), ed eventualmente anche acciaio¹¹⁰.

Tabella 6: Confronto dei diversi vettori energetici in relazione alla sicurezza dell'energia primaria utilizzata per la produzione

Strategie di decarbonizzazione dei trasporti	Relazione con la sicurezza energetica	
Elettrificazione	Riduzione delle importazioni di combustibili fossili e aumento dell'efficienza energetica	+
Gas naturale	Forte dipendenza dall'estero e in particolare da Paesi coinvolti in conflitti. Priorità da offrire ad altri usi.	-
Bio-combustibili, biogas e biometano	Aumentati rischi di competizione col settore agricolo dovuti al possibile <i>gap</i> di importazioni cerealicole.	-
Idrogeno blu	Costi ed importazione di gas naturale, bassa efficienza energetica, necessità di sviluppare siti di stoccaggio di CO ₂ oggi non esistenti.	-
Idrogeno verde	Bassa efficienza energetica, costi tuttora elevati, limitazione di disponibilità di energia a basso costo all' <i>overgeneration</i> da fonti rinnovabili e competizione con usi industriali.	~

Anche se l'elettrificazione rimane la strategia tecnologica con maggiori sinergie tra riduzione di emissioni e sicurezza dell'approvvigionamento energetico, **diverse sono le sfide regolatorie da affrontare**. La prima questione riguarda la fiscalità: l'Italia è il paese in Europa con le più alte **tasse energetiche** dopo la Germania e fra le più alte al mondo anche nel settore trasporto passeggeri. La riduzione dei consumi di petrolio ridurrà il **gettito fiscale** che dovrà essere recuperato altrove. Le accise sulla benzina in Italia sono attualmente 18 e finanziano una serie di spese che si sono accumulate negli ultimi 70 anni, sette delle quali solo nell'ultima decade. Si tratta di misure distorsive, regressive e applicate in modo differenziato, generando impliciti sussidi ambientalmente dannosi di rilevante costo sociale. Si apre dunque l'opportunità di una **riforma della**

¹¹⁰ N. Armaroli. A. Barbieri, Nature Italy 2021, [\[10.1038/d43978-021-00109-3\]](https://doi.org/10.1038/d43978-021-00109-3).

fiscalità energetica e di una armonizzazione con gli altri Paesi europei come anche richiesto nell'ambito del *Fit for 55*.

All'interno di questa revisione va programmata **una progressiva rimodulazione delle tasse di circolazione, che deve evolvere verso il principio "chi inquina paga"**. Peraltro, nella transizione verso un parco auto sempre più decarbonizzato, una tassa di circolazione calibrata all'inquinamento fornirà anch'essa un gettito via via decrescente. Pertanto, si dovrà abbinare all'inquinamento anche una **componente della tassazione basata sull'utilizzo con forme di "road pricing"** da applicare ad ogni motorizzazione. La tecnologia delle scatole nere – pur con complessi, ma risolvibili, problemi legati alla privacy – potrebbe permettere di modulare il *road pricing* sulla base del tipo di uso (es. urbano/extra-urbano, ore di punta/ore non di punta, ecc.).

Conclusioni e raccomandazioni

Nel trarre le conclusioni, va innanzitutto evidenziato un concetto già espresso in diversi punti del documento: le scelte affidate alla politica per favorire la trasformazione ecologica dovrebbero dipendere da **una visione olistica che guardi al sistema energetico nel suo complesso**, nelle sue dimensioni locali, nazionali, europee e internazionali. Nella transizione verso lo zero-netto di emissioni climalteranti, che si fonderà su un sistema basato sulle fonti rinnovabili e su vettori energetici derivati in modo preponderante dalla produzione di elettricità¹¹¹, è necessario quindi tenere presenti le molte condizionalità, i limiti produttivi, le soluzioni tecnologiche oggi già disponibili e quelle più promettenti per il prossimo futuro.

Il nuovo sistema energetico **non potrà pertanto essere sviluppato bottom-up, ma dovrà essere progettato sulla base di studi e modelli di ottimizzazione tecnico-economica**. Non è possibile, infatti, compiere scelte aprioristiche su determinate soluzioni tecnologiche nella considerazione che (come avvenuto in passato con carbone, petrolio e gas) i vettori energetici siano una *commodity* praticamente inesauribile **al di là dei problemi ambientali/climatici, della disponibilità e della sicurezza energetica**. I vettori energetici decarbonizzati come l'idrogeno verde, i biocombustibili avanzati, i combustibili sintetici e il biogas/biometano – alcuni dei quali saranno anche oggetto di importazione da Paesi con alta disponibilità di energia rinnovabile – avranno tutti limiti quantitativi e di prezzo, e, **a fronte di differenti utilizzazioni competitive, dovranno essere destinati prioritariamente** a quegli usi che presentano vincoli tecnologici (e/o vantaggi territoriali) e non dispongono di alternative praticabili.

Nel percorso verso la neutralità climatica e verso i *target* intermedi al 2030, è necessario quindi introdurre politiche nazionali – allineate con quelle europee – capaci di raggiungere con la massima efficienza gli obiettivi di riduzione delle emissioni. In termini pratici, questo significa **individuare quelle azioni che permettono di massimizzare l'abbattimento delle emissioni con la minore necessità di investimenti per nuovi impianti di energie rinnovabili** – e quindi minori costi –, promuovendo al tempo stesso l'innovazione e lo sviluppo di settori a medio-alto contenuto tecnologico e a elevato valore aggiunto. Nell'ambito della trasformazione epocale in corso del sistema energetico, mantenere ridotti i consumi e dare priorità alle tecnologie efficienti è essenziale per assicurare la sostenibilità della transizione – ad esempio per l'uso dei

¹¹¹ Eccettuati il biogas/biometano e l'eventuale ricorso residuale a combustibili fossili con CCS.

materiali – e massimizzare i co-benefici ambientali o sociali. Questa necessità è riflessa negli obiettivi di efficienza energetica e di riduzione dei consumi energetici presenti nel pacchetto *Fit for 55* che accompagnano quello di abbattimento delle emissioni.

In estrema sintesi, è prioritario:

- **attuare al più presto politiche di riduzione del parco circolante italiano e del cambiamento strutturale verso una mobilità sostenibile**, con significativi interventi infrastrutturali e gestionali sul trasporto collettivo e le altre modalità di trasporto sostenibile;
- **avviare immediatamente il processo di elettrificazione delle auto** al fine di centrare gli obiettivi di decarbonizzazione anche nel breve termine;
- **sviluppare le infrastrutture di ricarica;**
- **installare sufficiente nuova potenza di energia rinnovabile e di stoccaggio.**

La convenienza del processo di sostituzione dei veicoli è anche determinata dai seguenti fattori:

- la sostituzione della vettura privata o di flotte aziendali avviene regolarmente ed è considerata periodicamente nel budget di ciascuna famiglia o azienda;
- il *Total Cost of Ownership* delle vetture elettriche è già oggi leggermente migliore di quello di vetture equivalenti a combustione interna, anche se il differenziale non è ancora tale da compensare gli altri fattori che ne limitano la loro adozione;
- la promozione del mercato di auto elettriche, oggi ancora più costose all'acquisto delle ICE, e in particolare delle flotte aziendali, permetterebbe a breve di alimentare il mercato dell'usato e facilitare l'accesso ad acquirenti con minori disponibilità economiche;
- la promozione del mercato di auto elettriche farebbe aumentare i volumi di vendita e facilita l'abbassamento del costo dei veicoli nuovi;
- l'offerta di auto elettriche (*Full Electric* e *Plug-in Hybrid* a range elettrico esteso) sul mercato è in crescita esponenziale e la pubblicità appare molto focalizzata su questo settore, evidente segno di svolta degli interessi dei produttori;
- nel breve periodo andrebbe in particolare facilitata la transizione elettrica di mezzi furgonati e di altri veicoli merci più pesanti, in particolare per quelli utilizzati per il settore in crescita della consegna di merce in città, e di mezzi di trasporto pubblico che abbinano esigenze di riduzione delle emissioni con la riduzione dell'inquinamento nei centri abitati.

In questo quadro sarebbe pertanto importante **reintrodurre forme di incentivazione delle auto**, non lasciando fuori le flotte aziendali, dando un focus relativamente maggiore ai mezzi commerciali elettrici per il trasporto merci, per agevolare il decollo del nuovo mercato che ha importanti ricadute industriali e rilevanti effetti (anche economici) sia sulla riduzione delle emissioni climalteranti, sia sulla riduzione dell'inquinamento atmosferico, sia sulla minore spesa per acquisto di combustibili fossili dall'estero. **L'incentivazione deve però essere proporzionata e non distorsiva.** Per fare degli esempi, nel caso del trasporto privato per il trasporto passeggeri potrebbe essere limitata ai casi di **rottamazione di veicoli più inquinanti** – anche premiando

forme di rottamazione che portino alla riduzione del parco circolante (es. la rottamazione di due veicoli per l'acquisto di uno o la rottamazione di un veicolo per l'acquisto di abbonamenti per il trasporto collettivo). Dovrebbe poi essere (per le vetture private) a **progressione decrescente in funzione del costo d'acquisto** e potrebbe anche essere costituita da un mix di riduzioni delle tasse di circolazione per le BEV e di inasprimento per altre motorizzazioni in funzione delle emissioni. La proporzionalità deve comportare inoltre che le forme incentivanti siano meno convenienti rispetto a incentivi allo *shift* modale, ad esempio privilegiando **investimenti di spesa pubblica su trasporto pubblico, ferrovie e piste ciclabili**. Per i mezzi commerciali sarebbe importante legare gli incentivi agli utilizzi urbani e alla intensità d'uso, trovando formule che non creino competizione con lo *shift* modale dalla gomma al ferro.

I costi di ricarica – sia in termini di tariffe, sia di tempi – devono essere ridotti assicurando un sufficiente numero di punti di ricarica, anche domestica (ad esempio il governo UK obbliga tutti i nuovi edifici ad avere stazioni di ricarica). **Le agevolazioni per l'installazione di wallbox dovrebbero essere mantenute**, promuovendo anche l'installazione di ricariche condominiali in particolare nelle comunità energetiche.

Il **prezzo dell'energia elettrica deve però calare** in parallelo a una forte promozione – sulla spinta delle azioni del PNRR e della semplificazione autorizzativa – di un massiccio investimento in fonti rinnovabili e stoccaggio non soltanto “*utility-scale*”, ma anche in comunità energetiche e privati.

Quello che sembra evidente, però, è che **il meccanismo di formazione del prezzo sembra oggi inadatto a un mercato elettrico in cui le rinnovabili, il cui costo di produzione sta continuamente scendendo, devono arrivare entro il 2030 a superare il 70%**. Se si prosegue ad adottare il sistema di prezzo marginale, la tariffa verrà sempre determinata dal gas che comporta i costi più alti (oggi più che doppi rispetto alle rinnovabili). Le aste recenti hanno attribuito un incentivo per le rinnovabili intorno ai 65-70 €/MWh che, se sommato al PUN (Prezzo Unico Nazionale) medio degli ultimi 2-3 anni prima della crisi del gas, portava a una remunerazione delle rinnovabili intorno ai 120-130 €/MWh; oggi il PUN determinato dal gas è superiore ai 200 €/MWh. In una prospettiva di mercato fortemente instabile in seguito all'invasione russa dell'Ucraina, sarebbe utile **trovare un meccanismo a livello europeo per separare la determinazione del prezzo dell'energia prodotta da fonti fossili da quella prodotta dalle rinnovabili**, garantendo a queste ultime una remunerazione equa e premiante, in particolare in presenza di reinvestimento degli utili in ulteriori rinnovabili. Prossimamente saranno presentate le proposte della Commissione europea e di ACER al riguardo.

In aggiunta a politiche di riduzione dei costi di acquisto, è possibile **agire anche sui costi operativi** (tassazione, pedaggi, ecc.). Questo è specialmente rilevante per incentivare la transizione all'elettrico in veicoli ad alto utilizzo. I veicoli commerciali offrono un punto di ingresso importante in questo senso, mentre tale approccio è sconsigliato per le autovetture private, per evitare effetti “perversi” di aumento del loro utilizzo. Anche nel formulare questa politica per i veicoli commerciali occorre però fare attenzione agli effetti di lungo periodo, ricordando che uno *shift* modale dalla gomma al ferro deve avvenire anche nel settore merci, alla luce degli obiettivi globali di sviluppo sostenibile.

I provvedimenti di incentivazione trovano già complemento nei progetti finanziati dal PNRR per l'estensione delle stazioni di ricarica pubbliche, per le comunità energetiche e per la promozione delle rinnovabili. Il completamento normativo richiederebbe inoltre:

- **la definizione normativa e tariffaria degli impianti di stoccaggio** a servizio della rete elettrica;
- **la definizione di criteri e norme tecniche eventuali per il *Vehicle-to-Grid* (V2G)** e la verifica di tutte le condizioni tecnico-normative necessarie (incluso l'adeguamento tecnico delle capacità di comunicazione dei contatori intelligenti) per una effettiva promozione delle **comunità energetiche**, facendole uscire dall'attuale situazione di dipendenza dai sussidi.

Si dovranno poi progettare politiche industriali e misure di *re-skilling* e di accompagnamento compatibili con gli aiuti di Stato per **facilitare la transizione del comparto automotive italiano e per agganciare al meglio le nuove catene di valore che si stanno creando a livello europeo e internazionale**. L'impegno del Paese nel campo delle batterie deve essere particolarmente rafforzato, in linea con la discussione sviluppata in precedenza sull'innovazione.

Al di là della transizione tecnologica per veicoli e vettori energetici, il **trasporto ferroviario** è quello che ha la possibilità di sfruttare più e meglio di altri settori gli investimenti previsti dal PNRR e costituirà un elemento portante per lo sviluppo sostenibile del sistema complessivo della mobilità. Per quanto riguarda il **trasporto merci su gomma** per le lunghe distanze, per cui la tecnologia di transizione non è così ben definita come nel caso delle auto, è bene condurre ulteriori approfondimenti con i partner europei, con le imprese che producono mezzi pesanti e infrastrutture e con gli stakeholder. Questi vanno finalizzati a meglio individuare le strade tecnologiche su cui concentrare sperimentazione, dimostrazione e investimenti infrastrutturali "*low-regret*" e devono essere attivati in tempi molto stretti.

Un simile programma va impostato fin da subito e condotto anche per il **settore navale e aereo**, non solo per l'esplorazione delle migliori opzioni tecnologiche ma anche per identificare le strade più convenienti per la produzione di combustibili sostenibili di transizione e decarbonizzati, al fine di definire priorità di ricerca, sviluppo, dimostrazione e diffusione in scala, anche in termini di *partnership* pubblico-privato. Data la natura internazionale del trasporto marittimo e aereo, è importante anche in questo caso collaborare con partner europei e internazionali e valutare con attenzione i relativi aspetti geo-politici e diplomatici.

Le raccomandazioni non possono limitarsi alla normativa nazionale, in quanto il settore è fortemente dipendente da normative europee, e in particolare dalla ampia proposta regolatoria del pacchetto *Fit for 55* che accompagna la messa in opera del *Green Deal* europeo e della legge europea sul clima. Il settore dei trasporti è interessato da numerosi provvedimenti avanzati in questo pacchetto di misure, dalla proposta di inserire tutti i trasporti nel sistema ETS, alla revisione della Direttiva sulla tassazione dei prodotti energetici, ai nuovi target dell'*Effort Sharing Regulation*, ai nuovi obiettivi per le energie rinnovabili, ai più stringenti limiti per le emissioni delle auto e dei furgoni, alla revisione del regolamento AFIR, alle iniziative "*ReFuelEU Aviation*" e "*FuelEU Maritime*". In prospettiva, il settore è anche interessato dalla revisione dei limiti per le emissioni dei mezzi pesanti per cui si attende una proposta della Commissione europea nel 2022.

La negoziazione in corso sull'insieme del pacchetto *Fit for 55* non deve essere condotta in modo separato da diversi Ministeri. L'interrelazione fra tutte le politiche menzionate e quelle non menzionate che fanno parte del quadro del *Green Deal* è tale da richiedere un approccio integrato.

Nel quadro delle iniziative politiche afferenti ai trasporti, senza dubbio il provvedimento che ha avuto maggiore impatto mediatico è l'esplicita proposta di proseguire sulla strada già intrapresa della riduzione delle emissioni dei veicoli fino al **phase-out della vendita di nuovi veicoli e furgoni con motori a combustione interna al 2035**, logicamente correlata con l'obiettivo generale di giungere allo zero-netto di emissioni al 2050. Il presente documento ha messo in evidenza con vari argomenti la maturità, la parità anche in termini di *Total Cost of Ownership* e il rapido progresso tecnologico della tecnologia elettrica a batteria.

Il punto di vista di questo gruppo di esperti è che la proposta della data del 2035 sia ottimale per dare alle imprese del settore i giusti incentivi per programmare meglio l'evoluzione dei modelli e le strategie di produzione – incluso il *re-skilling* del personale – e vendita, e per permettere ai consumatori di fare scelte ponderate sulla base di una crescente offerta di prodotti e gamma di prezzi. È senza dubbio anche una **grande occasione** per nuovi operatori nel campo delle nuove tecnologie e dei futuri servizi per occupare nascenti nicchie di mercato, ma è anche un **grave rischio** per aziende a bassa capacità di innovazione di mancare l'aggancio con le nuove catene di valore che si stanno creando. Sarà quindi necessario **accompagnare questo processo con un programma di politiche industriali, di ricerca e sviluppo e di formazione**, in grado di sostenere e spingere alla crescita un settore produttivo ricco di capacità e di eccellenze.

Opporsi o cercare di dilazionare questo processo – che sta avvenendo su scala planetaria e che sta accelerando – sarebbe una scelta miope che può soltanto portare alla marginalizzazione del nostro settore *automotive*. Agganciare le nuove catene di valore, guidate in Europa soprattutto dalla Germania e dalla Francia, cercando di attestarsi soprattutto sui settori a maggiore valore aggiunto, è la scelta migliore ed è una strada possibile. Questo processo di innovazione avrebbe positive ripercussioni anche in altri settori collegati al trasporto, non solo quello tradizionale dell'*automotive*, e rappresenterebbe un'opportunità per espandere il nostro sistema produttivo verso settori a medio-alta tecnologia e a elevato valore aggiunto. Si pensi, ad esempio, alle tecnologie per i veicoli autonomi, alla robotica, ma anche al settore della produzione energetica.

In questo contesto, la negoziazione del *Fit for 55* è un momento importante per la crescita di consapevolezza, nel confronto con la Commissione europea e con gli altri governi nazionali, sulla gestione del percorso di decarbonizzazione che l'Unione ha deciso – con la legge europea sul clima – di compiere per raggiungere al 2050 la neutralità climatica.

Questo documento si era aperto ponendo in risalto la rilevanza del sistema dei trasporti per il suo fortissimo impatto in termini di emissioni e si conclude mettendo in evidenza come affrontare correttamente le sfide che questo comporta avrà effetti non soltanto sulla possibilità di raggiungere gli obiettivi di decarbonizzazione, ma anche sulla creazione di **nuove opportunità industriali e di servizi con la generazione di nuova occupazione, di sviluppo economico e di miglioramento dell'ambiente**.

Gli elementi più rilevanti del 6° rapporto IPCC per il settore dei trasporti

Durante l'ultimazione del presente documento, l'**Intergovernmental Panel on Climate Change** (IPCC) dell'ONU **ha pubblicato l'ultimo volume del sesto assessment report del 4 aprile 2022**, in seguito all'approvazione del relativo sommario esecutivo da parte dei Paesi membri. Il rapporto segue a distanza di sette anni l'ultimo uscito, riassumendo la conoscenza scientifica sul tema climatico. In particolare, il *Working Group III* si è occupato di soluzioni e strategie, elaborando un capitolo dedicato al settore trasporti. I principali risultati evidenziano come **la mobilità elettrica sia la tecnologia che ha compiuto i maggiori progressi e che ha il maggiore potenziale di riduzione delle emissioni dei trasporti, in sintonia con quanto affermato in questo documento**. Si riporta di seguito la traduzione dell'"*high-level statement*" (C.8) sui trasporti, facente parte del "*sommario per i decisori politici*" approvato dall'IPCC, con il relativo livello di *confidence*:

- **le azioni che influenzano la domanda e le tecnologie a basse emissioni di gas serra** possono ridurre le emissioni del settore dei trasporti nei paesi sviluppati e limitare la crescita delle emissioni nei paesi in via di sviluppo (*high confidence*);
- gli **interventi incentrati sulla domanda** possono ridurre l'intensità di uso di tutti i servizi di trasporto e sostenere il passaggio a modalità di trasporto più efficienti dal punto di vista energetico (*medium confidence*);
- i **veicoli elettrici alimentati da elettricità a basse emissioni offrono il più grande potenziale di decarbonizzazione** per il trasporto terrestre, sulla base del ciclo di vita (*high confidence*);
- i **biocarburanti sostenibili** possono offrire ulteriori vantaggi di mitigazione nel trasporto terrestre a breve e medio termine (*medium confidence*);
- i **biocarburanti sostenibili, l'idrogeno a basse emissioni e i derivati (compresi i combustibili sintetici)** possono supportare la mitigazione delle emissioni di CO₂ di **navi, aerei e trasporti terrestri pesanti**, ma richiedono **miglioramenti del processo di produzione e riduzioni dei costi** (*medium confidence*);
- molte strategie di mitigazione nel settore dei trasporti avrebbero vari **vantaggi collaterali**, inclusi miglioramenti della qualità dell'aria, benefici per la salute, accesso equo ai servizi di trasporto, minore congestione del traffico e ridotta domanda di materiali (*very high confidence*).

Oltre al sommario esecutivo, il rapporto discute delle tecnologie per la decarbonizzazione della mobilità nel sommario tecnico (sezione TS 5.3) e nel capitolo dedicato all'interno del rapporto (Capitolo 10). In questi si evidenzia **come il settore dei trasporti abbia un notevole potenziale di riduzione delle emissioni, ma come questo dipenda dalla decarbonizzazione del settore energetico**, in particolare nel trasporto terrestre. Riguardo alle tecnologie a batterie, il rapporto evidenzia come **le batterie agli ioni di litio siano previste rimanere quelle dominanti** e come la disponibilità dei materiali e il riciclo delle batterie permetteranno di soddisfare una domanda crescente di veicoli elettrici. Il rapporto pone anche molta enfasi sulla riduzione e il cambiamento della domanda di trasporto, attraverso **il trasporto condiviso, il telelavoro e consumi ridotti**. Nelle città e in altre aree urbane una **maggiore connettività e accessibilità**, insieme a programmi che incoraggino **i cambiamenti del comportamento dei consumatori**, sono evidenziate come leve cruciali per ridurre le emissioni e, allo stesso tempo, promuovere il benessere privato e sociale.



8. Domande frequenti

In questa sezione sono state raccolte alcune domande frequenti riguardo i temi trattati nel Rapporto. Per facilità di lettura sono state raggruppate per argomenti: combustibili e tecnologie, trasporto stradale leggero, trasporto stradale pesante e TPL, trasporto navale, batterie.

Combustibili e tecnologie

1. I biocombustibili e biocombustibili avanzati possono rappresentare un'alternativa valida all'elettrificazione nell'ottica della decarbonizzazione, anche per ridurre il peso della transizione sui cittadini?

I biocombustibili sono più indicati se impiegati per modalità di trasporto che devono ridurre le emissioni ma non possono ricorrere a soluzioni basate sull'elettrificazione, per via delle caratteristiche di taglia e tipo di uso dei veicoli. Possono quindi essere utilizzati **nel settore marittimo (per i viaggi su distanze lunghe) e nell'aviazione**.

Dal momento che i biocombustibili hanno un costo superiore ai combustibili tradizionali, per introdurli è necessaria una tassazione per i combustibili fossili e/o regolamenti che ne richiedano l'adozione. Proposte in questo senso sono state avanzate dalla Commissione europea nel pacchetto *Fit for 55*.

Nella fase di transizione verso l'approvazione di queste proposte e prima dell'aumento dei veicoli elettrici nel comparto dei veicoli su strada, **è possibile usare biocombustibili in altri settori**. Il loro utilizzo può anche consentire all'Italia di adempiere agli obblighi della *Renewable Energy Directive* e può aiutare a ridurre possibili effetti negativi su investimenti già stati fatti, soprattutto nell'ambito delle tecnologie avanzate, che saranno quelle in grado di rispondere meglio alla sfida della decarbonizzazione in futuro.

Nel futuro sarà importante focalizzare la diversificazione dell'energia per i trasporti su gomma attraverso elettricità decarbonizzata e dare priorità all'uso di biocombustibili per navi e aerei.

2. Qual è la differenza tra biocombustibili e biocombustibili avanzati? E quelli sintetici?

La differenza è **legata alla loro sostenibilità e alla loro capacità di abbattere le emissioni**. I **biocombustibili di prima generazione** sono prodotti da coltivazioni

agricole dedicate, e come tali hanno profili di sostenibilità modesti, specialmente se prodotti in Italia, anche a causa della possibile competizione ed effetto sui prezzi dei prodotti agricoli.

I **biocombustibili avanzati (o di seconda generazione)** hanno **profili migliori**, soprattutto se basati su materie prime di scarto (es. oli alimentari o grassi animali usati, residui agricoli, biomasse legate ad attività di gestione delle foreste). Il loro potenziale è vincolato alla disponibilità di materie prime seconde e va usato massimizzando i benefici. Il loro costo è anche più alto, in generale, dovendo anche ripagare i costi del loro sviluppo tecnologico.

I **combustibili sintetici decarbonizzati** sono invece prodotti di sintesi a partire da idrogeno “verde” e carbonio di origine biogenica (da CO₂ o da materie prime carboniche derivate da biomasse) o altre molecole (ad esempio azoto atmosferico per produrre ammoniaca). Oggi hanno costi energetici ed economici molto alti, ma ci si aspettano aumenti di efficienza in futuro dovuti allo sviluppo tecnologico. Se ne prevede **un utilizzo soprattutto in campo aereo e navale, probabilmente però non prima del 2040**.

3. Il gas può essere uno strumento utile per ridurre il carico emissivo dei trasporti? A quanto ammonta la riduzione di CO₂? Quali sono i settori in cui potrebbe essere contemplabile questa soluzione?

Il gas naturale di origine fossile ha un **differenziale di emissioni climalteranti molto limitato nei trasporti e comporta comunque emissioni inquinanti** di NO_x, polveri sottili e altro. La combustione del metano – a fronte di un piccolo abbassamento della resa in potenza – comporta una **riduzione massima del 20% in termini di emissioni dirette** (legate alla combustione) di CO₂ rispetto alla benzina, il differenziale è invece inferiore rispetto al diesel (che beneficia di motori più efficienti).

A questo vanno aggiunte le **emissioni fuggitive di metano**, sia in fase di combustione che di produzione, trasporto e distribuzione del gas. Alcune di queste sono molto difficili da abbattere, dal momento che si verificano in paesi terzi e possono generare un bilancio sul ciclo di vita peggiore per il gas fossile rispetto ai prodotti petroliferi, per tutte le modalità di trasporto.

Una soluzione potenzialmente utile ad abbattere le emissioni è il **biometano** prodotto da scarti agricoli, da reflui zootecnici e fognari e da frazioni organiche dei rifiuti urbani raccolti in modo differenziato. Quest’ultimo è disponibile in quantità limitate destinate ad acquisire un’importanza crescente per rimpiazzare progressivamente il gas fossile nella generazione elettrica e in altre applicazioni industriali che necessitano di temperature alte. Ciò rende investimenti in nuove stazioni di rifornimento nei trasporti difficili da giustificare sul piano della decarbonizzazione.

Le **tensioni tra la Federazione Russa e l’Europa**, a seguito dell’invasione dell’Ucraina, non volgono a favore di un incremento importante dell’uso del gas nei trasporti nei prossimi anni. La possibile diminuzione dei volumi di gas provenienti dalla Russia sarà molto probabilmente accompagnata da un processo di razionalizzazione dei consumi, che difficilmente vedrà un allargamento negli impieghi finali.

4. Quale sarà il peso dell'idrogeno nel percorso di transizione ecologica della mobilità?

L'idrogeno è attualmente prodotto per la quasi totalità da combustibili fossili ed è usato in prossimità dei luoghi di produzione per via di alti costi di trasporto e distribuzione. Usarlo oggi nei trasporti senza cambiare processo produttivo significa aumentare significativamente le emissioni di gas serra. Per consentire all'idrogeno di contribuire alla decarbonizzazione, è necessaria una **produzione basata su processi capaci di evitare emissioni di gas serra nell'ambiente. Il più rilevante si basa sull'elettrolisi dell'acqua** usando elettricità rinnovabile o nucleare. Altri possono utilizzare combustibili fossili, a condizione che si realizzi lo stoccaggio geologico della CO₂ a seguito di processi di cattura della CO₂ attualmente non usati commercialmente, o la produzione di polvere di carbonio, che deve trovare applicazioni sul mercato o essere gestita come un rifiuto.

A partire da questo punto ci sono **tre possibilità**. La prima è usare l'idrogeno decarbonizzato direttamente. La seconda è combinarlo con carbonio di origine biogenica per la produzione di idrocarburi sintetici. La terza è combinarlo con l'azoto dell'aria per produrre ammoniaca (come già si fa per ottenere i fertilizzanti, fatto salvo che l'idrogeno usato per questo, oggi, è di origine fossile). Queste strade hanno vantaggi e svantaggi, a seconda dell'applicazione.

Nel primo caso (uso diretto) può essere conveniente farlo in applicazioni che sono collocate con le unità di produzione, dal momento che i costi di trasporto, distribuzione e compressione rendono altre opzioni non economiche. Nel secondo è più facile il trasporto, ma si registrano perdite energetiche e costi economici legati alla produzione degli idrocarburi sintetici. Nel terzo, si potrebbe usare l'ammoniaca come combustibile (adatto per applicazioni navali), ma occorre fare attenzione per via della sua tossicità.

In tutti i casi, ci si trova di fronte oggi a problemi rilevanti in termini di competitività economica. La priorità è quindi **lo sviluppo di soluzioni innovative** che consentano di ridurre questi problemi, per fare in modo che le applicazioni che già necessitano di idrogeno oggi possano passare a forme decarbonizzate. A quel punto sarà possibile immaginare quali soluzioni potrebbero essere più sensate se si volesse usare l'idrogeno anche in altri settori.

L'aspettativa è che **l'uso dell'idrogeno per i trasporti abbia più senso in casi in cui non vi sia competizione efficace (dal punto di vista dei costi) con l'elettrificazione diretta, come nel caso delle navi e degli aerei per tratte di lunga distanza.**

5. Qual è il ruolo dei combustibili sintetici nella transizione della mobilità?

I combustibili sintetici si ottengono dalla combinazione di idrogeno e carbonio, per ottenere idrocarburi, oppure dalla combinazione di idrogeno con l'azoto, per ottenere ammoniaca. Per fare in modo che gli idrocarburi sintetici possano contribuire efficacemente alla decarbonizzazione, è necessario che l'idrogeno venga prodotto da fonti di energia primaria e/o processi a basse emissioni (questo vale anche per l'ammoniaca decarbonizzata) e che il carbonio sia di origine biogenica (non fossile) o derivi dall'atmosfera con processi di *Direct Air Capture* (DAC). Il carbonio biogenico è soggetto a limitazioni in termini di disponibilità a partire da biomasse sostenibili o

processi fermentativi. Il secondo richiede grandi quantità di energia per essere catturato e combinato con l'idrogeno ed è dunque limitato dalla quantità di energia a basse emissioni che richiede per essere prodotto su larga scala.

Data la complessità e la natura energivora dei processi di produzione dei combustibili sintetici, è importante (anche in caso di produzione da elettricità rinnovabile) fare in modo che **siano utilizzati solo in mancanza di opzioni alternative capaci di competere economicamente e/o disponibili in quantità sufficienti**. Per queste ragioni, l'aspettativa è che l'uso di combustibili sintetici per i trasporti abbia più senso **nelle navi (in forma di idrocarburi e/o ammoniaca) e negli aerei (come parte dei sustainable aviation fuels, SAF), specie per tratte di lunga distanza**.

La stessa logica suggerisce di non ricorrere a combustibili sintetici ma piuttosto all'elettificazione diretta anche per il calore degli edifici e nell'industria, specie nei casi in cui sia possibile ricorrere a soluzioni tecnologiche ad alta efficienza, come le pompe di calore¹¹². L'idrogeno e i combustibili sintetici sono appropriati **solo nei casi in cui le temperature richieste dai processi industriali siano molto alte**, in aggiunta ad altre strategie che consentano la minimizzazione d'uso di prodotti che li necessitino, dal momento che sarà difficoltoso fare in modo che essi possano essere prodotti a basso costo.

6. Su quali settori e tecnologie descritte nel documento la filiera industriale italiana è a oggi già pronta e competitiva sul mercato? Quali settori e tecnologie, su cui si stanno concentrando gli investimenti (pubblici o privati), potranno rendere il nostro Paese competitivo nel medio termine? Quali invece vedono la filiera italiana in ritardo rispetto al contesto internazionale?

La filiera industriale italiana oggi è focalizzata in maniera significativa su tecnologie a combustione dal momento che queste hanno costituito il pilastro centrale della mobilità, in quasi tutte le modalità di trasporto.

Alla luce degli sviluppi estremamente rapidi e incoraggianti dei costi di produzione delle energie rinnovabili e delle batterie (queste ultime sulla spinta dell'adozione massiccia di batterie al litio nell'elettronica di consumo, che ha portato a incrementi della scala produttiva associati ad abbattimenti dei costi di produzione), oggi è di fondamentale importanza poter riposizionare il sistema produttivo italiano – in netto ritardo rispetto ad altri paesi – per **renderlo competitivo su queste nuove filiere di valore**.

Una delle priorità è lo sviluppo di **capacità produttive di batterie**, date le loro molteplici applicazioni in una vasta gamma di prodotti, su scala globale. Questo vale innanzitutto per la mobilità, come dimostrano l'emergere di milioni di veicoli elettrici a due ruote, investimenti molto significativi in capacità produttive di veicoli leggeri a batteria (auto, furgoni) e recenti annunci di ulteriori investimenti sulla produzione di mezzi pesanti. Questi sviluppi non sono limitati a partner industriali fondamentali per l'Italia (in particolare la Germania) ma includono anche altri attori di primaria importanza (in particolare Cina, Stati Uniti e India).

¹¹² The future of home heating, Imperial College London, 2022 [<https://www.imperial.ac.uk/...>].

Un discorso simile alla domanda di batterie si applica **alla produzione di pannelli solari e alla filiera dell'energia eolica**, entrambe in crescita esponenziale.

Al fine di assicurare una competitività continuativa del sistema produttivo italiano, è necessario dare priorità allo sviluppo tecnologico di soluzioni più vicine ai suoi punti di forza. Questo richiede investimenti in **attività di ricerca, sviluppo e dimostrazione** anche di soluzioni alternative all'elettrificazione diretta, come **idrogeno e combustibili sintetici**. In questo caso, è importante dare priorità allo sviluppo di componenti industriali necessari a queste filiere, non solo per lo sviluppo infrastrutturale sul territorio nazionale, ma anche ai fini di incrementare le possibilità di esportazione. Si pensi, ad esempio, al potenziale di produzione energetica rinnovabile a basso costo situato in aree geografiche prossime (es. Medio Oriente, Nord Africa) che potrebbe consentire l'apertura di un enorme mercato di esportazione per prodotti del manifatturiero italiano: elettrolizzatori, componenti del fotovoltaico, batterie.

Lo **sviluppo delle reti elettriche** è una priorità fondamentale in campo nazionale, così come lo sono anche le tecnologie digitali, e rappresentano entrambi settori ad alto valore aggiunto.

Più in generale, è importante anche dare priorità ad applicazioni dimostrative che hanno maggiori probabilità di riuscita quali, ad esempio, l'uso di combustibili sintetici nelle navi e nell'aviazione.

Non a caso, batterie, materie prime, idrogeno decarbonizzato e – presto – anche la catena di valore dei combustibili rinnovabili e a basse emissioni sono tutti inclusi tra le priorità della **strategia industriale europea** assieme a semiconduttori, dati industriali, *edge* e *cloud computing* e plastica circolare.

7. Quanta energia elettrica si dovrebbe produrre per soddisfare una mobilità completamente elettrificata (laddove possibile)?

I mezzi di trasporto con motore a combustione interna sprecano il 70-80% dell'energia contenuta nel combustibile sotto forma di calore di scarto. In Italia, le automobili consumavano nel 2019 (ultimo anno pre-Covid con statistiche complete) annualmente circa 0,92 EJ (22 Mtep, milioni di tonnellate equivalenti di petrolio) e il trasporto merci su gomma circa altri 0,46 EJ (11 Mtep). L'equivalente energetico in elettricità di questi 1,38 EJ (33 Mtep) è di circa **380 Terawattora/anno (TWh/anno)**. **I mezzi di trasporto elettrici sono però molto più efficienti**, con una resa totale intorno all'80%, ovvero già oggi **3 volte superiore** rispetto alle motorizzazioni tradizionali, e diventeranno ancora più efficienti con il progresso tecnologico.

Non si può però semplicemente dividere per 3 i 380 TWh/anno per ottenere le necessità future in termini di nuove energie rinnovabili. Infatti, l'Italia nei prossimi 20 anni deve anche affrontare e risolvere alcune carenze strutturali del sistema di trasporto nazionale, riducendo l'elevatissimo numero di auto private per abitante (il più alto d'Europa, Lussemburgo escluso), migliorando i propri trasporti pubblici locali, facilitando e promuovendo soprattutto la micro-mobilità ciclistica, trasferendo molti più passeggeri e merci (anche dall'aereo) su ferrovie più veloci e affidabili, sviluppando moderni servizi integrati di mobilità e riducendo la domanda anche con il maggiore ricorso allo *smart working*. Il successo delle politiche di *shift* modale verso trasporti pubblici o alternative di trasporto "dolci" dipende molto dalla qualità del servizio di trasporto offerto in termini di tempi, costi e comfort rispetto a mezzi motorizzati privati.

L'insieme di tutte le azioni di efficientamento del sistema dei trasporti – ad esempio un autobus da 50 posti al pieno delle sue capacità permette un'efficienza energetica circa 5 volte superiore rispetto ai 50 passeggeri che viaggiano su 33 automobili con 1,5 passeggeri in media a bordo – ha la potenzialità di **ridurre di un ulteriore 30%** le necessità energetiche del settore portandolo **intorno a 100 TWh/anno** (esclusi i consumi energetici per la produzione di combustibili decarbonizzati per navi e aerei). Con le attuali tecnologie non si può però prevedere un simile efficientamento per il trasporto navale e aereo.

Trasporto stradale leggero

8. La tecnologia ibrida può essere un'alternativa valida per la transizione? E l'ibrida plug-in?

La tecnologia ibrida è stata e sarà ancora molto utile per migliorare l'efficienza energetica e, grazie a questo, ridurre quantitativamente le emissioni di gas serra. Tuttavia, solo nella **forma ibrida ricaricabile (plug-in)** ha capacità di permettere una maggiore diversificazione energetica. La ragione è in larga misura legata alla spiccata capacità del motore elettrico accoppiato alla batteria di consentire l'uso dell'elettricità come vettore energetico, combinata ad una maggiore efficienza del motore elettrico, rispetto a quello a combustione nella conversione di energia in moto.

L'accesso a una rete di ricarica diffusa (a casa, in ufficio e in destinazioni commerciali) è importante per permettere agli ibridi *plug-in* di **viaggiare effettivamente in modalità elettrica**, aspetto chiave per un contributo più significativo all'incremento dell'efficienza e per l'abbattimento delle emissioni (anche di inquinanti locali). Per lo stesso motivo, occorre inoltre che gli ibridi *plug-in* siano dotati di sistemi in grado di verificare efficacemente che il loro uso sia in modalità elettrica.

Due vantaggi ulteriori degli ibridi ricaricabili riguardano la loro capacità di massimizzare il rapporto tra km elettrici e batterie (in presenza di batterie che possono sostenere un alto numero di cicli di utilizzo), con benefici per l'uso efficiente di materiali critici, e la possibilità (data dalla presenza del motore a combustione) di permettere un adattamento progressivo alla transizione tecnologica verso l'elettrico. Il rischio è che presto le auto PHEV si possano collocare a un livello di prezzo superiore a quello dei veicoli a batteria.

9. Le auto elettriche raggiungeranno lo stesso costo delle auto termiche?

Secondo il **Car Cost Index 2021 di Leaseplan**, forse il maggiore operatore di *leasing* di flotte aziendali, e secondo la più recente letteratura, nella maggior parte dei paesi europei, il **Total Cost of Ownership (TCO) delle auto elettriche è stato nel 2021 già inferiore al TCO delle auto con motorizzazioni tradizionali**. Con la crescita dei volumi di produzione, l'accresciuta competizione e il progresso tecnologico – in particolare delle batterie – si prevede un progressivo e costante **calo dei prezzi** di vendita per almeno i prossimi 15-20 anni. Data la maggiore semplicità e il minor numero di componenti, l'auto elettrica è destinata nel tempo a costare meno dell'equivalente a combustione interna, anche se i progressi nella guida autonoma, nella connettività e nei

sistemi di sicurezza renderanno in futuro le automobili assai più sofisticate, con crescenti costi nella sensoristica e nei sistemi di controllo.

Un aspetto importante da tenere presente è anche l'evoluzione dei costi dell'elettricità, che sono lievitati di recente per via dell'aumento del prezzo del gas, potendo influenzare negativamente la competitività economica delle auto elettriche. Investire in produzione elettrica da fonti rinnovabili, attualmente capaci di generare elettroni a costi inferiori alle alternative con emissioni più alte, sarà importante per affrontare questo problema in maniera strutturale. Altre soluzioni possono richiedere anche revisioni delle regole di mercato che determinano la formazione dei prezzi dell'elettricità.

Un altro elemento rilevante da considerare, specie alla luce degli eventi recenti legati alla guerra in Ucraina, è il costo delle materie prime, dal momento che potrebbe rallentare o rovesciare la tendenza alla riduzione dei costi di produzione delle batterie e di conseguenza, dei veicoli elettrici. Tuttavia, i medesimi eventi hanno anche portato a un incremento significativo dei prezzi dei combustibili fossili (compreso petrolio e prodotti petroliferi, oltre al gas), e quindi del costo operativo dei veicoli che li utilizzano (in questo caso a vantaggio dei veicoli elettrici).

10. La sostituzione di veicoli vetusti con nuovi modelli (Euro 6/VI) a combustione interna come incide in termini emissivi e di qualità dell'aria?

Questo tipo di sostituzione porta **chiari benefici in termini di qualità dell'aria** dal momento che i livelli di emissione di inquinanti **locali** sono significativamente più bassi per i veicoli Euro 6/VI che per veicoli vetusti (in particolare Euro 3/III o precedenti). Tuttavia, **questa stessa sostituzione non porta vantaggi in termini di abbattimento delle emissioni di gas serra (e quindi per la decarbonizzazione)**. Questo perché le norme di emissioni Euro 6/VI riguardano le emissioni di inquinanti locali come monossido di carbonio (CO), ossidi di azoto (NO_x), particolato e composti organici volatili e **non incidono sul consumo energetico né sulle emissioni di CO₂**.

Al fine di abbattere la CO₂ occorrono veicoli con **migliore efficienza energetica** (che porta a minori emissioni di CO₂ a parità di chilometri percorsi), veicoli che usano **combustibili con basso contenuto di gas serra** sul ciclo di vita (questo è il caso di alcune forme avanzate di biocombustibili) e veicoli **elettrici**, specie se in combinazione con elettricità rinnovabile. Questi ultimi hanno caratteristiche che permettono anche di abbattere le emissioni di inquinanti locali.

I **veicoli a idrogeno**, attualmente, emettono più emissioni di gas serra rispetto anche a veicoli a combustione, dal momento che l'idrogeno oggi è prodotto essenzialmente da fonti fossili e considerando la catena di perdite energetiche che si verificano nelle fasi di produzione, trasporto, distribuzione e uso dell'idrogeno stesso.

Tra tutte le soluzioni, l'elettrificazione diretta ha un profilo di costo al km, efficienza e abbattimento di emissioni (sia in termini di gas serra che di inquinanti locali) migliore rispetto alle altre, combinata con chiare prospettive di ulteriori miglioramenti in futuro.

11. È vero che le auto a combustione interna sarebbero meno inquinanti nel ciclo di vita rispetto alle auto elettriche?

Lo studio condotto da Ricardo PLC per conto della Commissione europea nel 2020 ([Link Main Report](#)), probabilmente uno dei più completi rapporti recenti sul tema

delle emissioni sul ciclo di vita, ha chiaramente dimostrato che, fatte 100 le emissioni sul ciclo di vita di un'auto comparabile a benzina, le emissioni di un'auto a gasolio valgono 85 e quelle di un'auto elettrica della stessa classe valgono sulla media europea **45**, con un'ampia variabilità **a seconda dei mix energetici dei vari Paesi**. Infatti, le emissioni sul ciclo di vita di un'auto elettrica in Estonia, Polonia e Repubblica Ceca, ove la grande maggioranza dell'energia elettrica è prodotta dal carbone, sono molto simili a quelle di auto tradizionali, mentre il contrario avviene laddove l'alta penetrazione delle rinnovabili (Svezia, Danimarca) o dell'energia nucleare (Francia) rendono molto basse le emissioni della produzione di energia elettrica. L'Italia si colloca esattamente sulla media europea. Quindi, in Italia, mediamente, **un'auto a batteria ha emissioni pari a meno della metà di un'auto endotermica, considerando l'intero ciclo di vita**. Queste conclusioni sono ampiamente supportate dalla letteratura scientifica.

Bisogna anche ricordare che i veicoli a idrogeno attualmente non hanno la stessa capacità di abbattimento delle emissioni di gas serra, data la loro minore efficienza energetica rispetto a veicoli elettrici e siccome l'idrogeno oggi è prodotto essenzialmente da fonti fossili.

12. Quale contributo alla decarbonizzazione e alla qualità dell'aria possono fornire i veicoli ICE con propulsione a idrogeno?

Le emissioni di CO₂ allo scarico nei veicoli a combustione interna alimentati a idrogeno (HICEV) sono pari a zero, analogamente ai veicoli a celle a combustibile (HFCEV). Per un'effettiva decarbonizzazione, **è necessario però che l'idrogeno sia prodotto al 100% con tecnologie carbon free** e l'unico modo oggi disponibile e scalabile in Italia è la produzione da elettrolizzatori alimentati a elettricità rinnovabile (idrogeno verde). Se **l'idrogeno è invece ottenuto da metano o carbone** con tecnologie tradizionali (idrogeno grigio o marrone), **non vi è alcun vantaggio rilevante in termini di emissioni di CO₂**, rispetto ai motori tradizionali alimentati a combustibili di origine fossile. Nel caso dell'idrogeno blu con stoccaggio di CO₂ nel sottosuolo, è difficile trarre conclusioni precise perché questo approccio non è stato ancora implementato su scala industriale. È però assodato che si tratta di una tecnologia *low-carbon* e non *zero-carbon*¹¹³, quindi veicoli HICEV alimentati a idrogeno blu avrebbero comunque un'impronta di carbonio non trascurabile, anche legata alle emissioni in atmosfera della complessa catena di approvvigionamento del metano.

Per quanto riguarda l'inquinamento atmosferico, le uniche emissioni rilevanti di inquinanti primari per veicoli HICEV sono gli **ossidi di azoto (NO_x)**, che a loro volta favoriscono la produzione di inquinanti secondari come ozono e particolato ultrafine. Le emissioni di NO_x sono dovute al fatto che nella camera di combustione si utilizza aria (78% azoto) e non ossigeno puro, che avrebbe un costo proibitivo. Le emissioni di NO_x in motori HICEV possono essere ridotte in camera di combustione utilizzando miscele magre e notevolmente abbattute, in fase di post-combustione, con convertitori catalitici analoghi a quelli presenti nelle motorizzazioni ICE tradizionali. In breve, l'impatto sull'inquinamento da NO_x di veicoli HICEV sarebbe analogo a quello dei veicoli a metano: relativamente basso, ma non trascurabile.

¹¹³ *Hydrogen in a low carbon economy*, Committee on Climate Change, The UK Government, 2018 [<https://www.theccc.org.uk/...>].

Trasporto stradale pesante e TPL

13. Che costi avrebbe l'elettrificazione del trasporto pesante in termini infrastrutturali (electric road system) e quali controindicazioni a livello tecnico? È possibile elettrificare l'attuale parco mezzi con operazioni di retrofitting?

I sistemi di elettrificazione delle strade o "electric road systems/ERS" (in particolare quelli a catenaria, analoghi a quelli che si usano già nel caso dei *trolleybus*) sono stati sviluppati significativamente da partner industriali importanti in tempi recenti e possono appoggiarsi su decenni di esperienza sviluppata anche in ambito ferroviario. Gli stessi sistemi sono stati oggetto di **progetti pilota significativi in altri paesi europei** (in particolare Germania e Svezia e ora anche nel Regno Unito).

Questi sistemi possono essere efficaci per complementare soluzioni di ricarica di veicoli elettrici che già esistono e/o sono in corso di sviluppo (è il caso di sistemi di ricarica ad alta potenza), specie per facilitare il ricorso all'elettrificazione dei mezzi pesanti usati su strada sulle lunghe distanze.

Stime sviluppate nel caso del Regno Unito mostrano che **un costo infrastrutturale di 23,1 miliardi di euro** (19,3 miliardi di sterline) potrebbe consentire di sviluppare sistemi ERS per mezzi pesanti su strada, coprendo i principali assi di trasporto stradale, che contano per circa due terzi del totale dei veicoli-km percorsi dai mezzi pesanti. Questo sarebbe un chiaro incentivo economico per gli operatori di veicoli e il sistema sarebbe in grado di ripagarsi con i costi di esercizio, magari anche in presenza di accise sull'elettricità per gestire l'impatto delle perdite fiscali legate alla riduzione di consumo di gasolio. Il restante 30% dell'attività potrebbe essere coperto da batterie e/o mezzi ibridi ricaricabili.

I sistemi ERS offrirebbero anche **opportunità di integrazione e minimizzazione di costi** per lo sviluppo di stazioni di ricarica per auto e mezzi pesanti sugli stessi assi di trasporto, così come sistemi di comunicazione tali da facilitare la guida autonoma ed altre innovazioni digitali. Ulteriori vantaggi derivano dalle opportunità di gestione della domanda elettrica e di uso del suolo rispetto a stazioni ad alta potenza. I principali elementi di incertezza sono legati alle frequenze d'uso del sistema, specie in presenza di competizione diretta con soluzioni a batteria e stazioni di ricarica.

I veicoli ibridi ricaricabili (plug-in) e veicoli elettrici possono essere concepiti per poter funzionare con **sistemi di retrofit**. Questo, in combinazione con l'elettrificazione di mezzi pesanti usati su distanze più brevi (già oggetto di sviluppi commerciali significativi), può facilitare una transizione più rapida all'elettrificazione del trasporto pesante delle merci su strada, consentendo ai veicoli di operare su distanze più lunghe. Lo sviluppo di ulteriori progetti di dimostrazione e di accordi su scala continentale per l'adozione di sistemi ERS interoperabili attraverso le frontiere è necessario per permettere all'industria di incrementare la priorità di sviluppo di mezzi capaci di *retrofit*. L'interoperabilità è anche un requisito essenziale per via della rilevanza d'uso dei sistemi ERS per mezzi che si muovono su lunghe distanze.

Nel caso dei **veicoli attuali a combustione non è possibile ricorrere a retrofit**, a meno che non vengano anche integrati sistemi di propulsione elettrica (soluzione senza applicazioni commerciali).

14. Per quanto riguarda il trasporto pubblico locale (TPL), qual è la soluzione tecnologicamente fattibile di riduzione delle emissioni per i trasporti extra-urbani, laddove sia necessaria maggiore autonomia e minore disponibilità di punti di ricarica? Il metano può essere una soluzione nel breve periodo?

Per il trasporto **urbano**, **l'elettrificazione diretta con mezzi a batteria è attualmente la soluzione più efficace** da un punto di vista energetico, con le migliori chances di abbattere le emissioni di CO₂ e di farlo in modo economicamente vantaggioso, a condizione che si possa investire efficacemente in produzione elettrica decarbonizzata, a basso costo e su un ulteriore ammodernamento della rete elettrica. **Su distanze più lunghe, l'elettrificazione necessita di potenze e tempi di ricarica importanti, più difficili da gestire nel breve termine** e, probabilmente, più interessanti nel medio-lungo termine, grazie a miglioramenti delle performance delle batterie.

Una soluzione percorribile è quella dei veicoli *plug-in*, che possono consentire la guida in modalità elettrica per le tratte in ambito urbano (e al di là quando il costo delle batterie potrà consentire tratte più lunghe), a condizione che i veicoli abbiano accesso a infrastrutture di ricarica. Nel breve termine, i **biocombustibili** possono offrire un contributo (specie quelli derivati da rifiuti e scarti, dal momento che hanno maggiore efficacia nell'abbattimento delle emissioni), ma sono **molto più rilevanti per settori in cui l'elettrificazione diretta non sia possibile, come l'aviazione e il trasporto navale**.

I biocombustibili includono anche il biometano, che va distribuito in prossimità della capacità di produzione, al fine di evitare perdite energetiche che deriverebbero dalla sua distribuzione dedicata a un singolo uso finale. Va anche sottolineato che il biometano potrebbe avere un'importanza crescente per contribuire a ridurre le emissioni e la dipendenza dell'Italia dal metano di origine fossile e quindi per usi finali che non riguardano il settore dei trasporti. Si fa riferimento all'uso in applicazioni industriali e in centrali turbogas, specie per coprire carenze di dispacciamento di energie rinnovabili non programmabili per cause stagionali o meteorologiche.

Un problema chiave del **metano fossile** è la capacità molto limitata di abbattere le emissioni nel settore dei trasporti rispetto al diesel, se queste vengono analizzate sul ciclo di vita. Per questo motivo non dovrebbe essere preso in considerazione come opzione nella strategia di decarbonizzazione del TPL.

Trasporto navale

15. Quali sono le tecnologie attualmente utilizzabili per ridurre le emissioni nel trasporto navale? Quale segmento del trasporto navale (container, ro-ro ecc.) risulta a oggi più facilmente decarbonizzabile?

La priorità per il breve termine è **l'efficienza energetica** (attraverso recupero di calore), combinata all'assistenza del vento. Entrambe queste soluzioni hanno anche la possibilità di essere messe in pratica attraverso *retrofits* e hanno un potenziale significativo, ancora sottoutilizzato. Una soluzione ulteriore è **l'elettrificazione delle attività in porto**, utile anche per abbattere le emissioni di inquinanti locali (particolato), specialmente rilevanti per porti localizzati in prossimità di centri urbani. L'elettrificazione attraverso *shore power* e batterie è un'altra soluzione di grande rilevanza per le navi

che operano su rotte interne di brevi distanze (fino a 50 km per i traghetti e fino a 100 km per le navi passeggeri veloci), come dimostrano diversi progetti pilota sviluppati nei paesi scandinavi.

A complemento di queste soluzioni occorre reindirizzare l'uso di **biocombustibili avanzati** e da fonti sostenibili di biomassa, attualmente impiegati nel settore stradale, verso le navi, in analogia con quello che occorre fare anche per l'aviazione. Questo può includere anche il biometano in casi in cui sia già garantita capacità di distribuzione. Tuttavia, la capacità limitata di abbattere le emissioni sul ciclo di vita del metano fossile, combinata alla limitata capacità di produzione di biometano e alla rilevanza che questo è destinato ad avere – come già detto – in altri settori, non giustificano investimenti massicci nello sviluppo di nuove capacità di distribuzione.

Un terzo asse d'azione è lo sviluppo di motori capaci di utilizzare diversi combustibili – compresi **metanolo e ammoniaca** – e l'implementazione di progetti dimostrativi per l'uso di forme decarbonizzate di questi vettori energetici (così come l'**idrogeno**, anche se quest'ultimo è soggetto a sfide tecnologiche più importanti in termini di stoccaggio, tali da limitarne l'applicabilità alle navi, specie per il trasporto di lunga distanza) al fine di acquisire migliore conoscenza dei profili di costo e di permettere all'industria e agli enti che contribuiscono allo sviluppo di norme internazionali di giocare un ruolo più attivo nella definizione di quello o quelli che potranno essere i combustibili decarbonizzati delle navi in futuro, anche nel contesto dell'**Organizzazione Marittima Internazionale** (*International Maritime Organisation*, IMO).

Batterie

16. Che prospettive esistono per il riutilizzo e riciclo delle batterie per i veicoli elettrici?

La batteria agli ioni di litio (*Lithium Ion Battery*, LIB) di un autoveicolo è considerata a **fine vita quando si ricarica al 75-80%**, poiché non è accettabile compromettere ulteriormente la percorrenza. La durata di una batteria su un automezzo può dipendere in modo rilevante dalla modalità di ricarica. Generalmente, un utilizzo massiccio di ricariche veloci non è consigliabile ma un accumulatore LIB attualmente usato nel settore *automotive* può operare per circa **200.000 km**. Nei vari modelli di LIB disponibili sul mercato cambia la natura chimica del catodo (cioè il polo positivo) all'interno delle celle; in un pacco batteria vi sono centinaia o anche migliaia di singole celle tra loro collegate. I catodi più diffusi sono di tipo **NMC (Nichel Manganese Cobalto)**, con una frazione variabile dei tre metalli che mira alla progressiva riduzione del contenuto di cobalto, più raro e costoso. Le aziende più innovative stanno mettendo sul mercato batterie prive di questi tre metalli, tipicamente **LFP (Litio Ferro Fosfato)**, che hanno una densità energetica minore (quindi hanno maggiori volumi e sono utilizzabili su automezzi più grandi), ma sono caratterizzate da maggiore robustezza e possono arrivare a percorrere diverse centinaia di migliaia di km, coprendo l'intera vita dell'automezzo.

Quando una batteria *automotive* ha esaurito la sua vita utile è pronta per il cosiddetto utilizzo di seconda vita, che è tipicamente quello di **stoccaggio di fonti rinnovabili discontinue**, non soggetto a stringenti requisiti di ingombro volumetrico come negli automezzi e che quindi possono impiegare batterie ricaricabili solo parzialmente. Ad

esempio, nello stadio di Amsterdam, l'elettricità prodotta di giorno da un grande impianto fotovoltaico sulla copertura delle tribune, viene immagazzinata da anni in batterie "esauste" di auto, che forniscono elettricità durante gli eventi serali¹¹⁴. Di recente è stato siglato un accordo tra la società Aeroporti di Roma ed ENEL-X per un impianto analogo da realizzare presso l'Aeroporto di Fiumicino, che sarà uno dei più grandi al mondo nel suo genere (10 MWh, collegato a un impianto fotovoltaico da 30 MW)¹¹⁵. Tra 10-15 anni, l'aumento di batterie *automotive* esauste, pronte per la seconda vita, renderà disponibile un'enorme capacità di stoccaggio a basso costo per gli impianti rinnovabili. È una prospettiva di grande interesse strategico.

Al termine di questa seconda vita, le LIB inizialmente utilizzate nei veicoli debbono essere prese in carico dal costruttore, che le avvia al riciclo in ottemperanza al principio della **responsabilità estesa del produttore** in vigore nelle legislazioni più avanzate. Da un punto di vista strettamente tecnico, le batterie sono riciclate in un processo a stadi, che inizia con l'estrazione delle singole celle all'interno del pacco. Per separare successivamente i vari componenti (metalli come litio, nichel, cobalto, manganese, rame, alluminio o altri materiali come grafite, leganti e polimeri) le celle sono prima macinate, poi soggette a trattamenti meccanici e infine a trattamenti termici (pirometallurgici) e/o in fase liquida (idrometallurgici). Sono in fase avanzata diverse opzioni innovative per ridurre l'elevato impatto ambientale del processo, sviluppate da *startup* con grande potenziale di crescita¹¹⁶.

Da un punto di vista economico, una batteria LIB ha un valore tanto maggiore quanto maggiore è il contenuto di materiali costosi come il cobalto che, d'altro canto, si tende però a eliminare progressivamente per ragioni di disponibilità e costo. Dal punto di vista tecnico, gli sforzi di ricerca e sviluppo si orientano su batterie più facilmente disassemblabili, per soddisfare i principi dell'economia circolare. Un fattore di complessità è dato dal fatto che ogni azienda ha sviluppato i propri modelli di accumulatori, in forme diverse (cilindrica, prismatica)¹¹⁷. Non vi è quindi un sistema universale per disassemblare le LIB, come accade con dispositivi più standardizzati quali i pannelli fotovoltaici al silicio. Il settore del riciclo delle batterie LIB è previsto in **enorme crescita** nei prossimi anni ed è considerato strategico dalle aziende *automotive* e da molti Paesi, poiché limita in maniera sostanziale la dipendenza dall'estero per l'approvvigionamento di materie prime. L'importazione avviene infatti solo la prima volta; in seguito, il materiale diventa di origine domestica, se si è in grado di sviluppare una filiera del riciclo in parallelo allo sviluppo di *gigafactories*. La legislazione europea, con la nuova **European Battery Regulation**, prevede che nel 2030 siano obbligatori i seguenti livelli di riciclabilità nelle LIB: 95% per cobalto, rame, nichel, e 70% per il litio¹¹⁸.

¹¹⁴ [\[https://global.nissannews.com/...\]](https://global.nissannews.com/...).

¹¹⁵ [\[https://www.enel.com/content/...\]](https://www.enel.com/content/...).

¹¹⁶ D. Castelvechi, *Electric Cars: The battery challenge*, Nature, 2021, 596, 336

¹¹⁷ F. Monti, A. Barbieri, N. Armaroli, *Battery Electric Vehicles: Perspectives and Challenges*, Substantia 2019, 3(2), 75-89, [\[https://riviste.fupress.net/...\]](https://riviste.fupress.net/...).

¹¹⁸ New EU regulatory framework for batteries - Setting sustainability requirements, The European Parliament, 2021, [\[https://www.europarl.europa.eu/...\]](https://www.europarl.europa.eu/...).

17. Ci saranno sufficienti risorse di metalli per la produzione delle batterie?

Come indicato sopra, l'unico metallo a oggi insostituibile nelle LIB *automotive* è il **litio**. Attualmente vengono vendute nel mondo 75 milioni di automobili l'anno. Ammettendo un valore medio di litio di 10 kg per automobile (compresi gli scarti di lavorazione) servirebbero 750.000 tonnellate di litio all'anno, se fossero tutte a batteria. Attualmente vengono estratte circa 90.000 tonnellate di litio l'anno, che potrebbero coprire solo il 12% della produzione mondiale di auto, se fossero tutte BEV. Il litio, inoltre, serve per numerosi altri impieghi: batterie per dispositivi elettronici, industria del vetro, della ceramica e dei lubrificanti. Le riserve globali accertate di litio ammontano a **21 milioni di tonnellate**¹¹⁹ e sono in crescita continua, data la necessità di trovare in fretta risorse sfruttabili. Al momento quindi il rischio non è la disponibilità di litio, ma la possibilità di aumentare in modo considerevole la capacità di prospezione, rilascio permessi, estrazione, raffinazione e infine produzione di batterie. In prospettiva, laddove il volume della batteria non è un limite (grandi mezzi di trasporto, accumulo elettricità rinnovabile) il **sodio** potrà sostituire il litio. Questo potrà avere un effetto dirompente, dato che le riserve di sodio sono immense e ovunque, nei mari e sui continenti. Questo, unito a un'attività di ricerca e sviluppo senza precedenti, sia in ambito accademico che industriale, rende al momento difficile fare previsioni a lungo termine in merito alle risorse minerali effettivamente necessarie per le batterie del futuro. In ogni caso il **riciclo** dovrà essere fortemente incrementato.

¹¹⁹ US Geological Survey, Lithium 2021, [<https://pubs.usgs.gov/periodicals/...>].

9. Appendice

Tabella 7: Tecnologie energetiche in uso nei veicoli

Tecnologia	Motore	Vettore energetico	Batteria	Efficienza energetica (uso finale)	Emissioni dirette di CO ₂ e/o gas serra	Emissioni di inquinanti locali
ICE (<i>internal combustion engine</i>) o turbina (usata specialmente in aviazione)	A combustione	Combustibile	Sì Capacità limitata (< 1 kWh nelle auto) e solo per funzioni ausiliarie	20-25% per auto e autocarri (possibilmente 35-40% per autocarri su lunga distanza e con motore diesel) 40-45% per navi (grandi motori ICE) ed aerei (motore turbofan)	Sì, ad eccezione di uso di idrogeno come combustibile (inefficient e da un punto di vista energetico)	Sì, in funzione delle norme di emissione, del combustibile e per via di freni e pneumatici che producono particolato (per il trasporto terrestre)
HEV (<i>hybrid electric vehicle</i>)	A combustione ed elettrico	Combustibile	Sì Capacità limitata (2-3 kWh nelle auto) ed alimentata solo internamente	25-32%, per auto (possibilmente 40-45% per autocarri su lunga distanza e con motore diesel) 45-55% per navi (grandi motori ICE, che possono anche recuperare calore per la generazione elettrica in unità ausiliarie) ed aerei (motore turbofan)	Sì, fino al 30% in meno di ICE No in caso di uso di idrogeno come combustibile (inefficiente da un punto di vista energetico)	Sì, in funzione delle norme di emissione, del combustibile e per via di freni e pneumatici che producono particolato (per il trasporto terrestre)

Tecnologia	Motore	Vettore energetico	Batteria	Efficienza energetica (uso finale)	Emissioni dirette di CO₂ e/o gas serra	Emissioni di inquinanti locali
PHEV (plug-in hybrid electric vehicle) o REEV (range extender electric vehicle)	A combustione ed elettrico	Combustibile ed elettricità	Sì Capacità più alta di HEV (10-15 kWh nelle auto o più, specie per REEV) e più bassa di BEV, alimentata anche esternamente	Dipendente dall'uso, superiore a HEV ed inferiore a BEV	Dipendente dall'uso, superiori a HEV ed inferiori a BEV. No in caso di uso di idrogeno come combustibile (inefficiente da un punto di vista energetico)	Sì, in funzione delle norme di emissione, del combustibile e per via di freni e pneumatici che producono particolato (per il trasporto terrestre)
BEV (battery electric vehicle)	Elettrico	Elettricità	Sì Capacità alta (35-100 kWh nelle auto o più) ed alimentata esternamente	80-85%	No, nessuna	Solo per via di freni (inferiori a ICE) e pneumatici (superiori), nel trasporto terrestre
FCEV (fuel cell electric vehicle)	Elettrico	Idrogeno	Sì Capacità limitata (2-3 kWh nelle auto) ed alimentata solo internamente, a mano che non sia in configurazione REEV (possibile)	50-55% in architetture ibride (combinata a batterie)	Solo acqua (che può essere un problema importante se causa di ghiaccio sulle strade o se emessa in quota – caso dell'aviazione - soggetto che richiede ulteriore ricerca)	Solo per via di freni (inferiori a ICE) e pneumatici (superiori), nel trasporto terrestre

Tabella 8: Vettori energetici associati alle tecnologie veicolo e caratteristiche principali.

Vettore energetico	Compatibile con	Limiti di compatibilità	Limitazioni	Vantaggi
Benzina, gasolio, cherosene da petrolio fossile	ICE/turbina, HEV, PHEV/REEV	No	Alte emissioni di gas serra, anche in fase di produzione, volatilità dei prezzi e profili emissivi futuri non chiari.	Infrastrutture di produzione, trasporto e distribuzione completamente sviluppate
Gas naturale	ICE/turbina, HEV, PHEV/REEV	Occorre rete di distribuzione separata	Alte emissioni di gas serra, anche in fase di produzione. Volatilità dei prezzi. Profili emissivi futuri non chiari (nonostante il <i>methane pledge</i> , date le difficoltà di misura e di applicazione di sanzioni). Densità energetica di stoccaggio a bordo inferiore ai combustibili liquidi (per gas compresso), perdite energetiche di compressione/liquefazione e mantenimento nei serbatoi, anche associate a emissioni fuggitive di metano che ne peggiorano sostanzialmente il <i>footprint</i> climatico.	Infrastrutture di produzione, trasporto e distribuzione molto sviluppate
Bio-combustibili	ICE/turbina, HEV, PHEV/REEV	Occorre rete di distribuzione separata per biogas ed alcune forme liquide	Emissioni di gas serra ed impatti sull'uso del suolo dipendenti da dettagli specifici, potenziale sostenibile relativamente limitato. Sono soggetti a perdite energetiche nella fase produttiva superiori a quelle che caratterizzano i combustibili fossili. Se prodotti da attività agricole, richiedono la decarbonizzazione della produzione di fertilizzanti e dei processi produttivi per avere profili emissivi meno impattanti. Se prodotti da rifiuti, sono soggetti ad un potenziale di disponibilità limitato.	In molti casi (la principale eccezione è per il biometano) possono usare infrastrutture di trasporto e distribuzione già esistenti per i combustibili fossili

Vettore energetico	Compatibile con	Limiti di compatibilità	Limitazioni	Vantaggi
Bio-combustibili avanzati	ICE/turbina, HEV, PHEV/REEV	No	Emissioni di gas serra ed impatti sull'uso del suolo dipendenti da dettagli specifici. Potenziale sostenibile relativamente limitato, sebbene maggiore che nel caso di versioni non avanzate (grazie ad una base di materie prime vegetali più ampia). Perdite energetiche maggiori nella fase di produzione. Questo è un fattore certamente limitante per una rapida transizione. Altri limiti sono legati ai costi di produzione, difficili da abbattere anche in presenza di politiche che ne incrementano la domanda. Anch'essi richiedono, se prodotti da attività agricole, la decarbonizzazione della produzione di fertilizzanti e dei processi produttivi per avere profili emissivi meno impattanti. Necessitano di ulteriori attività di ricerca. Sono molto probabilmente meno cari da produrre in zone specifiche del mondo, con potenziali produttivi più alti (per esempio come derivati dalla canna da zucchero in Brasile). Sono soggetti a rischi di non essere competitivi in presenza di un mercato del carbonio che comprende soluzioni di stoccaggio e cattura della CO ₂ , senza limitazioni.	In molti casi possono usare infrastrutture di trasporto e distribuzione già esistenti per i combustibili fossili (più che nel caso di biocombustibili convenzionali). Possono avere un profilo di decarbonizzazione migliore rispetto a forme di biocombustibili convenzionali, possono essere soggetti a minori problemi in termini di impatto su uso di terre coltivabili (e prezzi del cibo) rispetto ai biocombustibili convenzionali

Vettore energetico	Compatibile con	Limiti di compatibilità	Limitazioni	Vantaggi
Combustibili sintetici Comprendono elettrocombustibili (o e-fuels), derivati da idrogeno decarbonizzato e carbonio derivato da biomassa (power and biomass to liquids, PBtL) o cattura atmosferica del carbonio (power to liquids PtL)	ICE/turbina, HEV, PHEV/REEV	No	Produzione attualmente minima e riservata a casi di ricerca, costi alti e perdite energetiche importanti per la produzione, richiede tecnologie non ancora sviluppate in scala (come <i>direct air capture</i>). Questo è un fattore certamente limitante per una rapida transizione. Sono molto probabilmente più economici da produrre in zone specifiche del mondo (ad esempio Cile, Nord Africa), con alto potenziale di energie rinnovabili come energia solare, eolica a calore. Sono soggetti a rischi di non essere competitivi in presenza di un mercato del carbonio che comprende soluzioni di stoccaggio e cattura della CO ₂ , senza limitazioni. Necessitano di ulteriori attività di ricerca. Le superfici da utilizzare per produzione con energia/elettricità solare sarebbero molto estese e difficilmente compatibili per un paese come l'Italia.	Potenzialmente decarbonizzabili e producibili da diverse fonti energetiche primarie, specie energie rinnovabili attraverso produzione di idrogeno da elettrolisi e combinazione con azoto (ammoniaca) o carbonio di origine biogenica (<i>power and biomass to liquids</i>) o derivato da <i>direct air capture (power to liquids)</i> . Possono essere una delle soluzioni di stoccaggio stagionale (nonostante le perdite e la competizione con altre tecnologie, non ancora sviluppate). Attualmente costano chiaramente di più dei biocombustibili (anche avanzati), potrebbero costare meno se prodotti in scala. Sono soggetti a minori problemi in termini di impatto su uso di terre coltivabili (e prezzi del cibo) rispetto ai biocombustibili.
Elettricità	BEV, PHEV, possibilmente anche FCEV (se in architettura plug-in)	Occorre rete di trasporto di distribuzione dedicata, che può beneficiare di quella già esistente (da rafforzare)	Non è facilmente stoccabile (specie sul lungo periodo, come lo stoccaggio stagionale) e può richiedere (specialmente nelle condizioni attuali) una riforma del mercato elettrico per essere accessibile a costi ragionevoli (altrimenti i costi sono dipendenti dal prezzo del gas, che è quello che spesso determina il costo di produzione marginale), richiede il probabile rafforzamento della rete elettrica se va usata anche come vettore energetico per i trasporti.	Produzione già largamente decarbonizzata, possibilità di produzione a costi più bassi se da fonti energetiche decarbonizzate (rinnovabili), rischi per investimenti in distribuzione ben inferiori all'idrogeno, buon allineamento con opportunità offerte da tecnologie digitali (anche per l'ottimizzazione dell'uso del <i>network</i> esistente).

Vettore energetico	Compatibile con	Limiti di compatibilità	Limitazioni	Vantaggi
Idrogeno	FCEV	Occorre rete di trasporto e distribuzione separata	Produzione attualmente derivata da sole fonti fossili (95% gas naturale), costi alti e perdite energetiche importanti per produzione, trasporto e distribuzione (usi attuali sono in prossimità della produzione), alto rischio di investimento per applicazioni commerciali, richiede ricerca e politiche che ne consentano lo shift produttivo verso processi decarbonizzati. Efficienza energetica assai inferiore all'elettrificazione diretta, con conseguenze importanti sulle capacità produttive necessarie.	Potenzialmente decarbonizzabile e producibile da diverse fonti energetiche primarie. Può aiutare alla gestione della variabilità di approvvigionamento e domanda elettrica grazie alle possibilità di stoccaggio. In particolare, può essere una soluzione di stoccaggio stagionale (nonostante le perdite energetiche significative e la competizione con altre tecnologie, non ancora sviluppate, come per esempio le batterie di flusso).